



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN DE LOS DEPÓSITOS CONTROLADOS

Treball realitzat per:

Aitor Gómez Lejarcegui

Dirigit per:

Antonio Aguado de Cea

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports.

Barcelona, 15/06/2018

Departament d'Enginyeria de la Construcció

TREBALL FINAL DE MÀSTER

AGRADECIMIENTOS

Realizar el trabajo final de máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos ha supuesto, sin duda, el mayor reto académico. Ha sido la investigación más amplia, profunda y pragmática que me ha requerido el estudio del tema de forma más exhaustiva y transversal, teniendo que plasmar de forma teórica-práctica toda mi formación académica.

Agradezco mi formación recibida a la Escola de Camins de Barcelona por el aprendizaje en la capacidad de resolver problemas mediante análisis de situación, así como, la de plantear alternativas. También, el haber obtenido el conocimiento para emplear métodos resolutivos para evaluación de alternativas; haber desarrollado la capacidad para analizar y entender los resultados de los problemas de forma madura, profunda, compleja, desde distintas visiones y perspectivas, y con sentido crítico. El desarrollo de estas capacidades para resolver problemas nos permite tener la seguridad de tomar decisiones ante problemas reales y prácticos; y así poder asumir las responsabilidades a las que nos encontramos en nuestra profesión como ingenieros.

Quisiera agradecer la dirección y colaboración de Dr. Antonio Aguado de Cea como tutor del trabajo por su seguimiento continuo, su hospitalidad, su compromiso; y, por su opinión rigurosa y crítica que me ha permitido responder ante el trabajo con exigencia y seguridad.

Mis más sinceros agradecimientos a la empresa constructora *CERTIS Obres i Serveis SAU* por darme la oportunidad de ampliar mi formación tanto académica como profesional.

Y, por último, pero no por eso menos importante, agradecer a mis padres, a mi familia; especialmente a Montserrat por su apoyo incondicional.

,

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

Aitor Gómez Lejarcegui

Departament d'Enginyeria de la Construcció – ETSECCPB

Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona Tech

Resumen

Respecto a la situación actual de la gestión de residuos en España, actualmente el 60% del peso de residuos urbanos generados tiene como destinación los vertederos o depósitos controlados de los cuales muchos de ellos padecen de irregularidades de diseño: drenajes de lixiviados inadecuados, capas sellantes insuficientemente impermeables, nula captación de gases y otros problemas ambientales como contaminación acústica y odorífica, y generación de plagas de animales. Esto significa que, desde el punto de vista de la ingeniería, aún hay muchos aspectos por mejorar el dimensionamiento de los depósitos controlados.

En este trabajo, se ha realizado una evaluación de sostenibilidad mediante la metodología MIVES para evaluar qué alternativa de sistema de impermeabilización para el depósito controlado localizado en Orís (Osona) es más sostenible, según la declaración de Río donde se define que la sostenibilidad se basa en tres aspectos principales: el económico, el social y el medioambiental.

Como alternativas a los distintos sistemas de impermeabilización de vertederos se han considerado dos: Una, la barrera mineral natural o tradicional compuesta por una capa de arcilla más una manta de bentonita; y otra, la barrera mineral artificial compuesta por una capa de arena bentonítica modificada con polímero conocida comercialmente como Trisoplast.

Respecto a los resultados de la evaluación de sostenibilidad, se ha obtenido que la solución con barrera mineral artificial es una solución más sostenible que con la barrera mineral natural para el caso concreto del depósito controlado de Orís. La alternativa con barrera mineral natural era la que tenía mejor puntuación social principalmente por su mayor conocimiento técnico por parte de la administración; pero a nivel económico y ambiental, la alternativa con barrera mineral artificial ha sido más favorable principalmente por su menor coste de inversión y por su mayor capacidad de impermeabilización.

Sustainability evaluation of landfill waterproofing systems.

Aitor Gómez Lejarcegui

Departament d'Enginyeria de la Construcció – ETSECCPB

Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona Tech

Abstract

Concerning the current situation of waste management in Spain, 60% of the weight of urban waste ends up in landfill sites, many of which have design flaws: inadequate leachate drainage, permeable sealing layers, non-existent gas capture and other environmental problems such as noise and odor pollution and pest's generation. This means that, from an engineering point of view, there are still many ways in which to improve landfill design.

In this paper, a sustainability evaluation has been carried out using the MIVES methodology to evaluate which alternative system of waterproofing is most sustainable for the controlled landfill at Orís (Osona), in accordance with the Rio Declaration, in which sustainability is defined according to three main aspects: economic, social and environmental.

As options for various landfill waterproofing systems, two have been considered: firstly, a natural mineral barrier composed of a layer of clay plus a sheet of bentonite and, secondly, an artificial mineral barrier composed of a layer of bentonite sand modified with polymer, commercially known as Trisoplast.

Regarding the results of the sustainability evaluation, it has been shown that the artificial mineral barrier is a more sustainable solution than the natural mineral barrier in the specific case of the Orís landfill. The natural mineral barrier got the highest social score, mainly due to the administration's technical knowledge of it, however on an economic and environmental level, the artificial mineral barrier has been a more favourable option, mainly due to its lower investment cost and its superior waterproofing capacity.

Avaluació de sostenibilitat des sistemes de impermeabilització dels dipòsits controlats.

Aitor Gómez Lejarcegui

Departament d'Enginyeria de la Construcció – ETSECCPB

Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona Tech

Resum

Respecte a la situació actual de la gestió de residus a Espanya, actualment el 60% del pes de residus urbans generats tenen com destí els dipòsits controlats dels quals molts d'ells presenten irregularitats de disseny com drenatges de lixiviats inadequats, capes impermeables insuficients, nul·la captació de gasos i altres problemes ambientals com contaminació acústica i odorífera, i generació de plagues d'animals. Això significa que, des del punt de vista de la enginyeria, encara hi ha molts aspectes per millorar el dimensionament dels dipòsits controlats.

En aquest treball, s'ha realitzat una avaluació de sostenibilitat mitjançant la metodologia MIVES per avaluar quina alternativa de sistema d'impermeabilització per al dipòsit controlat localitzat a Orís (Osona) és més sostenible, segons la declaració de Rio on es defineix que la sostenibilitat es basa en tres aspectes principals: l'econòmic, el social i el medi-ambiental.

Com alternatives als diferents sistemes d'impermeabilització de dipòsits s'han considerat dos: una, la barrera mineral natural o tradicional composta per una capa d'argila més una làmina de bentonita; y l'altra, la barrera mineral artificial composta per una capa d'arena bentonítica modificada amb polímer coneguda comercialment com Trisoplast.

Respecte els resultats de l'avaluació de sostenibilitat, s'ha obtingut que la solució amb barrera mineral artificial és una solució més sostenible que amb la barrera mineral natural per el cas concret del dipòsit controlat d'Orís. L'alternativa amb barrera mineral natural era la que tenia millor puntuació social principalment pel seu major coneixement tècnic per part de l'Administració; però a nivell econòmic i ambiental, l'alternativa amb barrera mineral artificial ha estat més favorable principalment pel seu menor cost d'inversió i per la seva major capacitat de impermeabilització.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|--------------|
| Capítulo 1: Introducción | 1 |
| 1.1 Introducción | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 4 |
| 1.3 Metodología..... | 5 |
| Capítulo 2: Estado de conocimiento | 7 |
| 2.1 Introducción | 7 |
| 2.2 Gestión de los residuos urbanos | 8 |
| 2.2.1 Recogida | 8 |
| 2.2.2 Transferencia..... | 10 |
| 2.2.3 Transporte | 11 |
| 2.2.4 Tratamiento | 13 |
| 2.3 Depósitos controlados | 16 |
| 2.3.1 Definición | 16 |
| 2.3.2 Clasificación | 16 |
| 2.3.3 Impactos | 18 |
| 2.3.4 Sistema de captación y tratamiento del biogás | 19 |
| 2.3.5 Sistema de gestión de lixiviado | 28 |
| 2.3.6 Emplazamiento | 35 |
| 2.3.7 Suelo e hidrología | 39 |
| 2.3.8 Sellado de la base | 40 |
| 2.4 Conclusiones | 44 |

| | |
|--|---------------|
| Capítulo 3: Estudio de las alternativas | 47 |
| 3.1 Introducción | 47 |
| 3.2 Condiciones de contorno | 48 |
| 3.2.1 Introducción | 48 |
| 3.2.2 Situación territorial | 49 |
| 3.2.3 Situación económica | 50 |
| 3.2.4 Situación social | 51 |
| 3.2.5 Situación ambiental | 52 |
| 3.2.6 Emplazamiento del depósito controlado de estudio | 53 |
| 3.2.7 Marco legal | 55 |
| 3.3 Justificación de las alternativas | 57 |
| 3.4 Barrera mineral natural | 59 |
| 3.4.1 Arcillas compactadas | 60 |
| 3.4.2 Mantas de bentonita | 61 |
| 3.4.3 Geomembranas impermeables (PEAD) | 62 |
| 3.5 Barrera mineral artificial | 63 |
| 3.6 Conclusiones | 66 |
| Capítulo 4: Evaluación de sostenibilidad | 71 |
| 4.1 Introducción | 71 |
| 4.2 Metodología | 72 |
| 4.2.1 Introducción | 72 |
| 4.2.2 Unidad funcional | 73 |
| 4.2.3 Alcance y límites del sistema | 74 |
| 4.2.4 Desarrollo del árbol de valores | 75 |
| 4.2.5 Asignación de pesos | 77 |
| 4.2.6 Función de valor | 79 |
| 4.3 Evaluación de los indicadores | 80 |
| 4.3.1 Requerimiento económico (R_1) | 80 |
| 4.3.2 Requerimiento social (R_2) | 86 |
| 4.3.3 Requerimiento medioambiental (R_3) | 90 |
| 4.4 Resultados de la evaluación | 94 |
| 4.4.1 Introducción | 94 |

| | |
|--|------------|
| 4.4.2 Introducción de datos | 94 |
| 4.4.3 Obtención del resultado final | 96 |
| 4.4.4 Análisis de sensibilidad | 98 |
| 4.5 Conclusiones | 99 |
| Capítulo 5: Conclusiones | 103 |
| 5.1 Introducción | 103 |
| 5.2 Conclusiones generales | 103 |
| 5.3 Conclusiones específicas | 104 |
| 5.4 Recomendaciones | 111 |
| Anejo 1: Recogida de residuos urbanos | 113 |
| A1.1 Introducción | 113 |
| A1.2 Modelos de segregación de los RSU | 114 |
| A1.2.1 Recogida no selectiva | 114 |
| A1.2.2 Recogida selectiva | 115 |
| A1.3 Sistemas de recogida de residuos urbanos | 121 |
| A1.3.1 Sistema de recogida puerta por puerta | 121 |
| A1.3.2 Sistema de recogida en contenedores superficiales | 122 |
| A1.3.3 Sistema de recogida en contenedores soterrados | 123 |
| A1.3.4 Sistema de recogida neumática | 126 |
| Anejo 2: Análisis de ciclo de vida | 129 |
| A2.1 Introducción | 129 |
| A2.2 Herramienta informática | 130 |
| A2.3 Unidad funcional | 131 |
| A2.4 Alcance y límites del sistema | 132 |
| A2.5 Inventario de ciclo de vida | 133 |
| A2.6 Evaluación del impacto | 135 |
| A2.7 Interpretación de los resultados | 135 |
| Referencias bibliográficas | 139 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos es, hoy en día, una de las grandes problemáticas que afronta nuestra civilización. Según la fuente Eurostat, en el año 2013, cada español había generado unos 547 kg de residuos que equivaldría a 1,5 kg por día. De estos residuos generados, según la misma fuente, un 60% del peso tiene como destinación final los vertederos o depósitos controlados como el que se presenta en la figura 1.1.



Figura 1.1 Depósito controlado. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los depósitos controlados en España a día de hoy, comentar que hay 142 vertederos activos de los cuales muchos de ellos presentan muchas irregularidades a nivel técnico.

En la figura 1.2, se presenta las principales fuentes de contaminación del vertido de residuos urbanos según la Escuela de Organización Industrial (EOI). Como se puede observar las principales fuentes de contaminación en un depósito controlado son el lixiviado y el biogás:

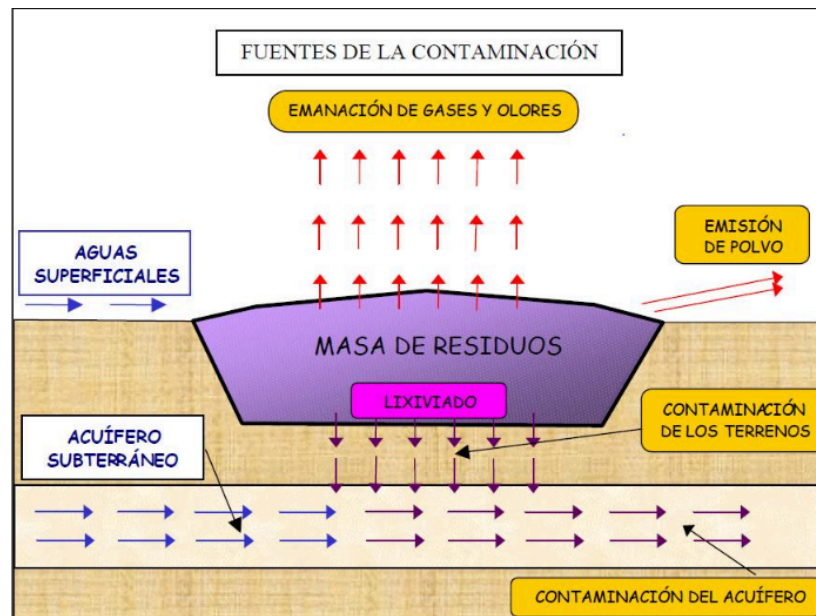


Figura 1.2 Mecanismos de contaminación del medio.
Fuente: Escuela de Organización Industrial (EOI).

- a) Respecto a la gestión de lixiviados: en un 35% de ellos, la recogida perimetral es insuficiente; en un 44% de ellos, el sistema de drenaje es inadecuado; y en un 10% de ellos, se acumulan lixiviados a pie de los taludes.
- b) En relación a revestimiento: en un 68% no tienen capas drenantes; en un 76% no tienen geomembrana impermeable; en un 35% no dispone de sistema de captación de gases y la recuperación energética procedente del biogás generado es muy minoritario.
- c) Otros problemas ambientales: un 28% causan malos olores; un 18% emiten polvo; un 19% causan ruido y molestias al tráfico; un 34% son causa de presencia de animales (aves, parásitos e insectos); y un 14% no disponen de un correcto cerramiento y vallado.

Para poder resolver esta problemática actual de la gestión de residuos es importante entender que no solo es importante concienciar a la sociedad de reducir los residuos generados y de fomentar el vertido selectivo y el reciclaje; sino que también es importante dimensionar y proyectar correctamente los vertederos o, mejor sea dicho, los depósitos controlados desde el punto de vista del desarrollo sostenible.

El concepto de desarrollo sostenible, según definición de la Agenda 21 (Río de Janeiro, 1992), es la conjunción de 3 pilares fundamentales que son el económico, el social y medioambiental tal y como se presenta en la figura 1.3.

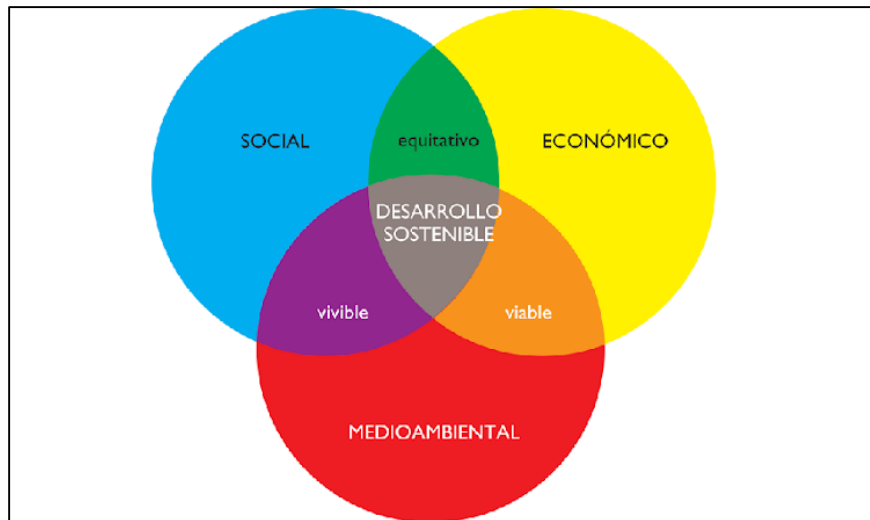


Figura 1.3 Desarrollo sostenible. Fuente: Emprendices.

Este concepto de desarrollo sostenible significa que la alternativa o solución más sostenible ante una problemática es aquella que obtenga mayor puntuación global, denominado índice de sostenibilidad, de los aspectos fundamentales que se han descrito en la figura anterior.

Consecuentemente a la situación explicada anteriormente vemos que estamos en una situación de expansión en el desarrollo técnico de los depósitos controlados. Por lo que he creído interesante evaluar las distintas soluciones de los sistemas de impermeabilización y sellado de la base que fueron planteadas en un caso práctico y real de estudio de la ampliación de la tercera fase del depósito controlado de Orís (Osona, Barcelona), con tal de tomar la decisión de qué alternativa era mejor según criterios de desarrollo sostenible.

Como soluciones ejecutivas de impermeabilización y sellado de depósitos controlados se estudian dos alternativas para el caso concreto del depósito controlado de Orís: con barrera mineral natural o tradicional y con barrera mineral artificial.

- 1) Barrera mineral natural o tradicional (BMN):** éste es el sistema de impermeabilización que más se ha utilizado en los vertederos de España. Se caracteriza por una capa de arcillas compactadas en contacto con el suelo más una lámina bentonita colocada encima y, por encima de ésta, otra lámina de material PEAD como se presenta en la figura 1.4. Esta solución es la más común como capa impermeabilizante dada que se ejecuta principalmente por materiales naturales procedentes de excavaciones o canteras; y, en la mayoría de los casos su coste es razonable. No obstante, en algunas situaciones donde

los depósitos de arcillas que cumplan con los requisitos de permeabilidad de proyecto, se encuentran lejanos a la obra, en consecuencia, resultará más costoso el transporte. Entonces, es cuando se plantean otras alternativas más viables económicamente y que cumplan con los requisitos técnicos.

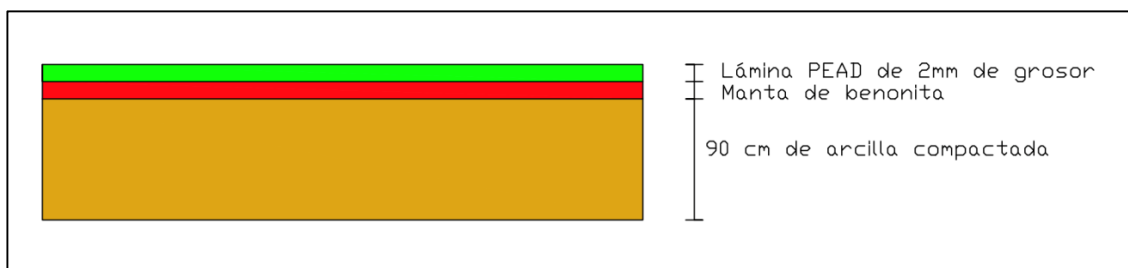


Figura 1.4 Sección capa impermeabilizante con barrera mineral natural (BMN). Fuente: Elaboración propia

- 1) **Barrera mineral artificial (BMA):** este sistema se desarrolló en Holanda dado que la arcilla en ese país era un recurso muy escaso. Como alternativa se desarrolló un material impermeable artificial conocido como Trisoplast (arena bentonítica modificada con polímero) que permite sustituir la arcilla y la manta de bentonita de la solución con barrera mineral tradicional; pero que igualmente se hace necesario disponer de una lámina PEAD instalada encima de este material para garantizar el sellado. En la figura 1.5 se presenta la sección de esta capa sellante:

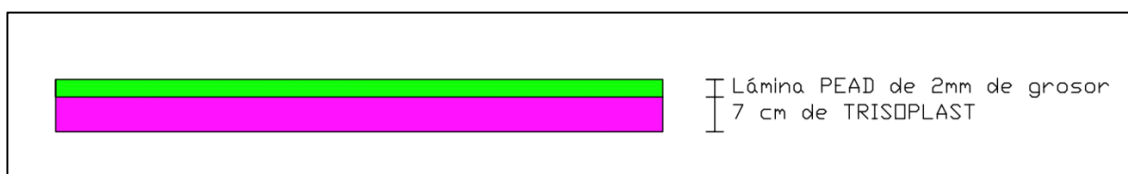


Figura 1.5 Sección capa impermeabilizante con barrera mineral artificial. Fuente: Elaboración propia.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal es realizar una evaluación de sostenibilidad con tal de tomar una decisión respecto a qué alternativa de sistema de impermeabilización del suelo para el caso concreto del depósito controlado de Orís (Osona) es mejor según criterios de desarrollo sostenible.

Como objetivos específicos del estudio, se proponen los siguientes:

- Ampliar los conocimientos de la gestión de los residuos urbanos desde el proceso de recogida hasta el proceso de tratamiento final, focalizándose en el estudio de los depósitos controlados: clasificación, impactos principales, sistemas de gestión del biogás y del lixiviado, criterios de emplazamiento y finalmente impermeabilización y sellado de la base.

- Estudiar en profundidad las alternativas de sistemas de impermeabilización y sellado de la base que se plantearon para el depósito controlado de Orís: barrera mineral natural y barrera mineral artificial.
- Aprender a desarrollar una metodología de toma de decisión entre alternativas mediante criterios de desarrollo sostenible.
- Mejorar el conocimiento y la aplicación de dos herramientas o metodologías de evaluación de alternativas que son: MIVES como herramienta para la evaluación de sostenibilidad y SIMAPRO como herramienta para la evaluación ambiental.

1.3 METODOLOGÍA

La evaluación de sostenibilidad, con tal de obtener el resultante de qué alternativa es mejor desde el punto de vista de la sostenibilidad, es en sí una metodología de toma de decisión entre alternativas. En la figura 1.6, se presenta la estructura del procedimiento de toma de decisión que se ha utilizado. El hecho de que la toma de decisión sea tenida en cuenta según el punto de vista de la sostenibilidad, hace que repercuta en la definición de los criterios con los que se evaluará las dos alternativas presentadas.

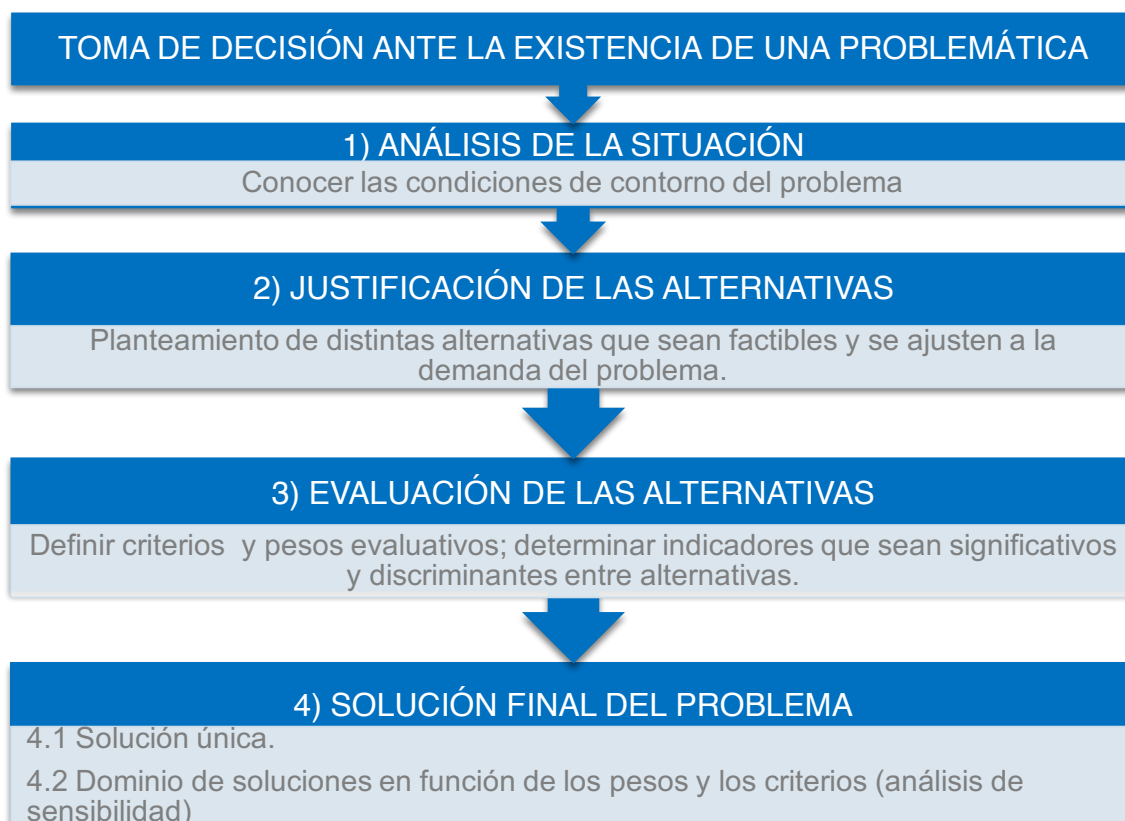


Figura 1.6 Estructura de toma de decisión ante la existencia de una problemática.

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo las pautas descritas en la figura 1.6, en el capítulo 2, se desarrollará el conocimiento de la gestión de residuos desde la recogida hasta el proceso final de tratamiento; focalizando en el conocimiento de los depósitos controlados: clasificación, impactos principales, sistemas de gestión del biogás y del lixiviado, criterios de emplazamiento y finalmente impermeabilización y sellado de la base.

En el capítulo 3, se definen las condiciones de contorno en las cuales nos encontramos ante el depósito controlado de estudio ubicado en Orís (Osona, Barcelona); y, posteriormente, se estudiará las alternativas de soluciones de sistemas de impermeabilización del sellado del depósito controlado de Orís. Estas alternativas, como se ha descrito anteriormente, son la barrera mineral natural y la barrera mineral artificial.

En el capítulo 4, en primer lugar, se describe la metodología utilizada para la evaluación de sostenibilidad mediante el programa MIVES (Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles). Esta herramienta informática libre desarrollada conjuntamente por la Universidad del País Vasco, Labein-Tecnalia y la Universidad Politécnica de Cataluña (parte probabilista en la Universidad de Coruña) permite sintetizar y objetivar la toma de decisión. La idea principal de esta herramienta es poder obtener un resultado final (entre 0 y 1) a partir de la evaluación o cuantificación de distintos indicadores o valores cuantificables que se obtienen de cada alternativa. Con posterioridad, en este capítulo, se presentan y se analizan los resultados de la evaluación de sostenibilidad mediante gráficos representativos; y, se realiza un análisis de sensibilidad para verificar y entender mejor los resultados obtenidos.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones generales y específicas resultantes del trabajo realizado; así como algunas recomendaciones que se han derivan de la realización de este trabajo.

Además, se ha creído interesante incluir un Anejo 1, con tal de poder disponer de la mayor información posible en relación a la gestión de residuos urbanos en un mismo documento. En el mismo se profundiza acerca de los modelos de segregación y los distintos sistemas de recogida de los residuos sólidos urbanos. Ahora bien, dado que esta temática ya se estudió en profundidad en un apartado del estado de conocimiento del trabajo final de grado: *Estudio comparativo de los modelos de gestión en la recogida de residuos urbanos mediante criterios de sostenibilidad* presentado el 23 de septiembre de 2015 por Aitor Gómez Lejarcegui y dirigido por Antonio Aguado de Cea, no se incorpora en el cuerpo del actual trabajo de fin de master. Finalmente, también se ha incluido el anejo 2, para poder presentar la metodología del análisis de ciclo de vida y obtener un resultado comparativo entre las dos alternativas de capas sellantes de los depósitos controlados. Esta metodología nos permite saber un valor comparativo entre las alternativas para determinar cuál tiene un mayor o menor impacto ambiental. De esta forma, esta evaluación nos ha permitido evaluar el indicador de Análisis de ciclo de vida (I_7) dentro del requerimiento medioambiental (R_3) en el capítulo 4.

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

CAPÍTULO 2

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha comentado en el capítulo 1, unos de los objetivos principales de esta tesina es realizar una evaluación de sostenibilidad de dos alternativas de sistemas de impermeabilización para la tercera ampliación del depósito controlado de Orís, Osona, Barcelona. Con tal de extraer aquellos aspectos fundamentales a tener en consideración en la evaluación de sostenibilidad, el objetivo del presente capítulo es desarrollar, por un lado, el conocimiento de la gestión de residuos desde la recogida de los residuos y transporte, hasta el proceso final de tratamiento de los residuos y valorización de los mismos, tal como puede verse en la figura 2.1; y, por otro lado, profundizar en el conocimiento de los depósitos controlados.

Todo ello nos servirá de base de información para que en el capítulo 3 podamos estudiar las alternativas de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados del caso concreto del Vaso B de Orís. Y, para que, en el capítulo 4, se evalúen las alternativas desde el punto de vista de la sostenibilidad.



Figura 2.1 Esquema del proceso de la gestión de residuos urbanos desde la recogida hasta el tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

2.2. GESTIÓN DE LOS RESIDUOS URBANOS

2.2.1. Recogida

2.2.1.1 Orígenes

El origen de la generación de residuos en nuestra sociedad se remonta a finales de siglo XVIII gracias a la Revolución Industrial que permitió un gran desarrollo científico y tecnológico. En consecuencia, surgieron nuevas actividades industriales; se desarrolló extraordinariamente el comercio; las ciudades incrementaron de demografía, densificaron su población; aumentando así los volúmenes de residuos urbanos generados.

Ese crecimiento científico, tecnológico, demográfico e industrial fue avanzando hasta que, llegado a los dos tercios del siglo XX, surgió la expansión de la economía basada en el consumo, el cambio de hábito en la adquisición de productos, la cultura del usar y tirar; se empezó a utilizar, en la fabricación de productos, materiales sintéticos no degradables como los plásticos. Fue, en este momento histórico, cuando empezó la gran problemática de la gestión de residuos urbanos por sus impactos críticos en el medio ambiente.

Desde entonces hasta que la sociedad se empezó a concienciar en la necesidad de reciclar y valorizar los residuos urbanos a principios de los 1990s, todo residuo tenía como destinación los vertederos como el que se presenta en la figura 2.2; causando graves problemas de contaminación de los suelos, de las aguas freáticas; y, produciendo molestias y enfermedades en las poblaciones próximas a los vertederos.

Los residuos urbanos se generan en los domicilios y en los establecimientos habituales propios de las ciudades (tiendas, almacenes, restaurantes, hoteles, pequeños talleres, etc.). Pero la gestión se lleva a cabo mediante la Administración, o bien, a través de contratas con empresas especializadas que recogen, transportan y tratan los residuos urbanos.

Es importante fomentar la especialización y el conocimiento técnico de la gestión de la recogida de los residuos urbanos; con el fin de mejorar las condiciones de higiene, seguridad, comodidad tanto para los operarios de la gestión como para los ciudadanos afectados por las molestias producidas y minimizar los impactos económicos, sociales y ambientales en nuestra sociedad.



Figura 2.2 Vertido de residuos. Fuente: Elaboración propia.

La gestión de la recogida de los residuos urbanos se planifica, por una parte, escogiendo un modelo de segregación que puede ser selectivo o no selectivo; es decir, cómo se separan los residuos urbanos en distintas fracciones; y, por otra parte, se utiliza uno o varios sistemas de recogida, que consiste en cómo se recogen; tales como, el sistema puerta por puerta, contenedores superficiales, contenedores soterrados y neumático como se puede ver en la figura 2.3.

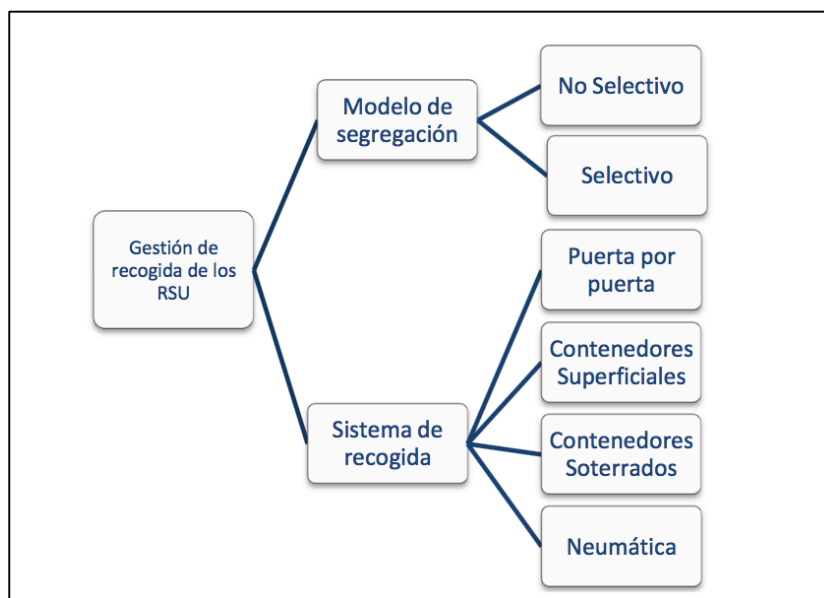


Figura 2.3 Esquema de gestión de recogida de RSU. Fuente: Elaboración propia.

Los modelos de segregación y los distintos sistemas de recogida se presentan y se desarrollan en el Anejo 1, puesto que esta temática ya se estudió en profundidad en un apartado del estado de conocimiento del trabajo final de grado: *Estudio*

comparativo de los modelos de gestión en la recogida de residuos urbanos mediante criterios de sostenibilidad presentado el 23 de septiembre de 2015 por Aitor Gómez Lejarcegui y dirigido por Antonio Aguado de Cea. No obstante, se ha estimado conveniente incluirla en el presente trabajo, con tal de poder disponer de la mayor información posible en relación a la gestión de residuos urbanos en un mismo documento.

2.2.2. Transferencia

En algunas circunstancias, como es el caso de las grandes ciudades, o si existe una mancomunidad de Ayuntamientos que utilice un sistema común, o si el punto de tratamiento está a cierta distancia, puede ser aconsejable que en vez de llevar los residuos urbanos directamente a los puntos de tratamiento, sea más práctico transportarlos con los camiones de recogida a puntos estratégicamente situados o estaciones de transferencia, donde se almacenan durante períodos cortos de tiempo, y de donde se recogen con camiones de mucha mayor capacidad que los transportarán a los centros de tratamiento como se presenta en la figura 2.4.



Figura 2.4. Esquema de estación de transferencia de residuos urbanos. Fuente: COGERSA.

Estas estaciones de transferencia tienen, entre otros objetivos, ahorrar en el transporte y alargar la vida de los vehículos de recogida. Las estaciones de transferencia pueden ser compactadoras o sencillas, tal como puede verse en la tabla 2.1. En ella se describen los sistemas que están compuestos cada tipología de estación de transferencia.

| Estaciones de transferencia | Constituidas por: |
|-----------------------------|--|
| Compactadoras | <ul style="list-style-type: none"> - Tolva receptora de la basura. - Sistema compactador. - Sistemas de carga de la basura compactada a los vehículos de transferencia (generalmente portacontenedores). - Sistemas de manejo de los contenedores. - Báscula. - Instalación de lavado. |
| Sencillas | <ul style="list-style-type: none"> - Playa de descarga de la basura (debidamente acondicionada para evitar lixiviados). - Palas cargadoras, para cargar los vehículos grandes de transferencia. - Báscula. - Instalación de lavado. |

Tabla 2.1 Tipologías de estaciones de transferencia de residuos urbanos. Fuente: Elaboración propia.

2.2.3. Transporte

El transporte a los centros de tratamiento puede realizarse según 3 tipologías: con el propio vehículo de recogida, con camiones procedentes de las estaciones de transferencia y con sistema neumático como se presentan en las siguientes figuras 2.5, 2.6 y 2.7, respectivamente.



Figura 2.5. Camiones de la recogida de residuos urbanos. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona.



Figura 2.6. Camiones procedentes de las estaciones de transferencia. Fuente: COGERSA.



Figura.2.7 A la izquierda sistema de recogida neumático estático. A la derecha buzones del sistema neumático estático. Fuente: página web Loveoverde.

En todos los casos, salvo en el neumático, una serie de camiones recorren diariamente una vía de circulación que lleva al centro de tratamiento y que, al menos teóricamente, debe ser estudiada y acondicionada para soportar el tráfico fijo diario que supone este transporte, y la carga por eje a que se somete la capa de rodadura de la carretera.

Asimismo, el paso diario de estos vehículos por zonas habitadas provoca una degradación del entorno de la vía de circulación que se traduce en un descenso del valor de las viviendas afectadas como consecuencia del ruido, de los posibles olores, de las posibles pérdidas de material y de las posibles filtraciones de lixiviados.

2.2.4. Tratamiento

Una vez han sido transportados a los centros de tratamiento, los residuos urbanos son sometidos a un proceso de tratamiento final en función del tipo o de las características de residuo. Los tratamientos finalistas más convencionales son los depósitos controlados, el reciclado, la incineración y el compostaje.

Según datos de Eurostat, en España en el año 2013, tal y como se presenta en la figura 2.8, se destinaron un 60% del peso de los residuos urbanos en los depósitos controlados; un 20% en el reciclado; un 10% para la incineración y para el compostaje.

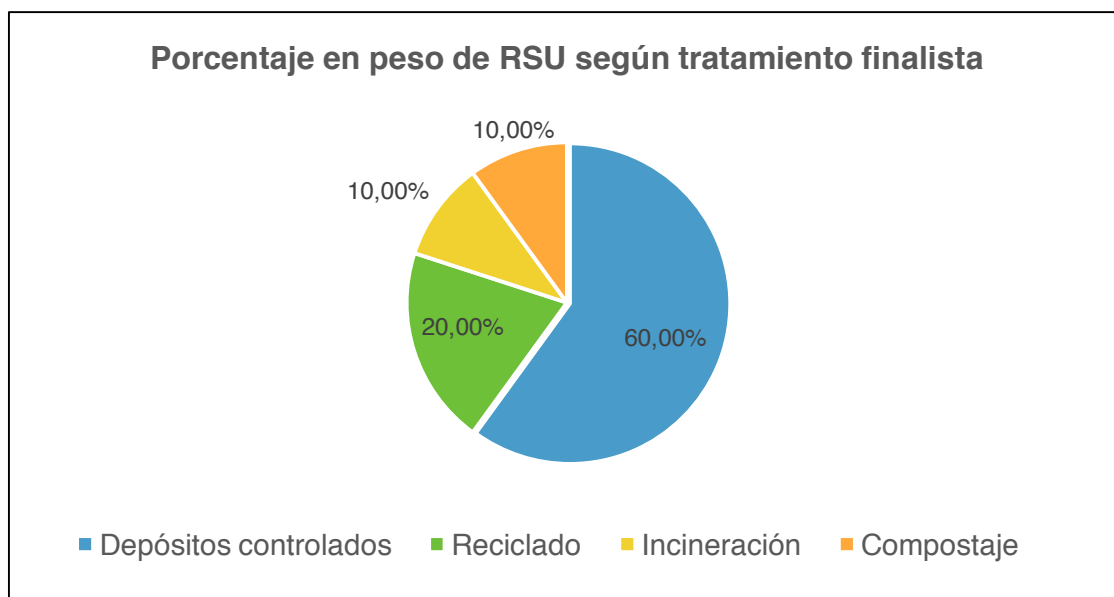


Figura 2.8. Tratamiento de residuos urbanos en España (2013). Fuente: Eurostat.

En la figura 2.9, se presenta los datos de los porcentajes de tratamiento finalista de los residuos urbanos en la Unión Europea. Observamos que en la Unión Europea se podría agrupar en 3 grupos según su gestión finalista de los residuos.

- Grupo 1: Serían aquellos países que la destinación a depósitos controlados es casi nula. Optan por un gran porcentaje de reciclado, incineración y compostaje. Es decir, revalorizan la totalidad de los residuos urbanos generados. En este grupo se encuentran países como Alemania, Suiza, Holanda.
- Grupo 2: Serían aquellos países que ya predomina los depósitos controlados como destinación finalista pero ya tienen un porcentaje considerable de revalorización de los residuos. En este grupo se sitúa España, Italia, Irlanda.
- Grupo 3: Aquellos países de la UE que destinan prácticamente la totalidad de sus residuos urbanos a los depósitos controlados. Estos países serían Bulgaria, Rumanía, Malta, Lituania.

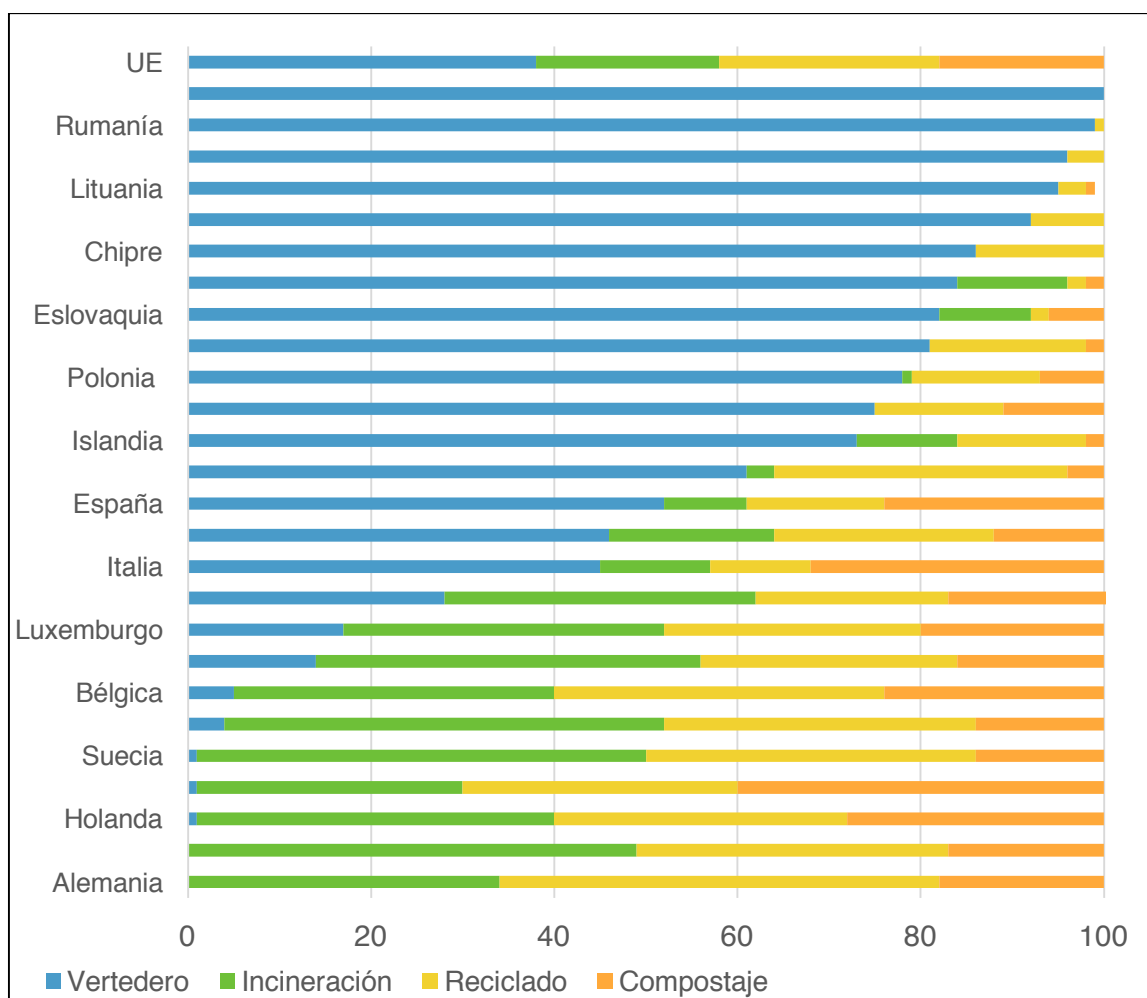


Figura 2.9. Porcentajes de tratamiento final de los residuos urbanos en la UE. Datos: Eurostat.

Como hemos visto, España se sitúa en el grupo de países que más utiliza la modalidad del depósito controlado como tratamiento finalista de los residuos urbanos. En la tabla 2.2, se presentan los 4 principales procesos de tratamiento de residuos detallando ventajas e inconvenientes de forma genérica.

| Tratamiento finalista | Ventajas | Inconvenientes |
|------------------------------|---|---|
| Incineración | <ul style="list-style-type: none"> • Dotación de un valor adicional al residuo por aprovechamiento energético. • El espacio de la instalación no se agota por acumulación de los residuos. • Reducción de la cantidad de residuos de incineradora depositados en vertedero. • La escoria resultante adquiere un valor como producto para la construcción. | <ul style="list-style-type: none"> • Es un método no libre de emisiones. Entre otros gases que se emiten son las sustancias órgano-cloradas que tienen una elevada toxicidad, son bioacumulables y tienen una alta persistencia en el medio ambiente. • Inversiones iniciales elevadas. • Generación de cenizas y productos de la limpieza de gases que deben ser llevados a vertederos. |
| Compostaje | <ul style="list-style-type: none"> • Revalorización de los residuos de materia orgánica que representan un porcentaje mayor del total de residuos urbanos generados (40-55%). • Se reduce la cantidad de residuos sólidos urbanos que termina destinada en los vertederos. • Permite cerrar el ciclo de la materia orgánica. • Dependiendo del volumen y de las circunstancias, hay la posibilidad de utilizarla con tecnología simple, barata y robusta. | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere la correcta segregación en origen por parte de la ciudadanía. • Emite gases contaminantes a la atmosfera. • Requiere una cierta inversión para núcleos de habitantes considerables. • Disponibilidad de terreno para el almacenamiento. • Sensible a la climatología. |
| Reciclaje | <ul style="list-style-type: none"> • Se reduce la cantidad de residuos sólidos urbanos que termina destinada en los vertederos. • Permite el ahorro de materias primas de materiales como vidrio, papel/cartón, metales, envases de plásticos y otros. • Mayor generación de empleo. | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere la correcta segregación en origen por parte de la ciudadanía. Las fracciones de residuos contienen altos contenidos de impropios y requieren procesos de selección costosos. • Requiere una mayor inversión inicial. |
| Depósitos controlados | <ul style="list-style-type: none"> • Baja inversión inicial, en la mayoría de los casos, en comparación con los demás tratamientos finalistas. • Mayor sencillez técnica. • En el caso de los depósitos biorreactores, permite el aprovechamiento del biogás generado. | <ul style="list-style-type: none"> • Elevado consumo de terreno. • Genera rechazo social. • Despilfarro de los recursos contenidos en los residuos. • Puede resultar un peligro medioambiental si sufre problemas en el sellado, captación de lixiviados o del biogás. |

Tabla 2.2. Ventajas e inconvenientes de los tratamientos finalistas de los residuos urbanos. Fuente: Elaboración propia.

2.3. DEPÓSITOS CONTROLADOS

2.3.1 Definición

La definición de un depósito controlado según el “DECRET 1/1997, de 7 de gener, sobre la disposició del rebuig dels residus en dipòsits controlats.” es la siguiente: *“un depósito controlado de residuos es toda instalación de disposición controlada de cualquier tipo de residuos, de procedencia propia o de terceros [...]”*

Desde mi punto de vista, un depósito controlado es una infraestructura que permite tratar de forma finalista y controlada aquellos residuos sólidos que no han podido ser revalorizados en otros procesos de tratamiento, de manera que se minimice los impactos ambientales, sociales y económicos. Si un depósito controlado fuera un modelo matemático basado en unas entradas, variables y unas salidas se describiría tal como se muestra en la tabla 2.3.

| Entradas (inputs) | Variables | Salidas (outputs) |
|---|--|---|
| Residuos sólidos no revalorizados de un sistema de gestión de residuos (tn) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Emplazamiento. ▪ Sistema de impermeabilización. ▪ Sistema de gestión de lixiviados. ▪ Sistema de captación del biogás. ▪ Sistema de recogida de aguas superficiales y pluviales. | Dimensionamiento del depósito controlado minimizando los impactos ambientales, sociales y económicos. |

Tabla 2.3. Modelo de dimensionamiento de un depósito controlado basado en entradas, variables y outputs. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2 Clasificación

Los depósitos controlados se pueden clasificar en función de varias consideraciones que se presentan en la siguiente figura 2.10 y se describen en la tabla 2.4.

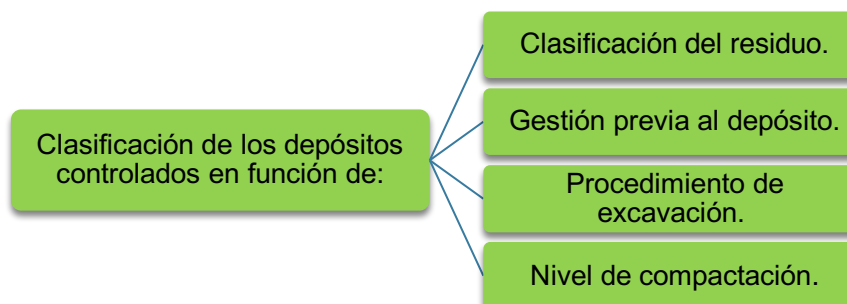


Figura 2.10. Clasificación de los depósitos controlados. Fuente: Elaboración propia

| CLASIFICACIÓN DE LOS DEPÓSITOS CONTROLADOS | | | | |
|---|--|--|--------------------------|--|
| (a) Clasificación del residuo | 1) Clase I: Residuos inertes. 2) Clase II: Residuos no peligrosos. 3) Clase III: Residuos peligrosos. | | | |
| (b) Gestión previa al depósito | a) Residuos crudos, sin trituración ni procesado previo, que los camiones recolectores depositan directamente en el área de vertido. b) Residuos triturados previamente, que tendrán mayor densidad y darán más capacidad al vertedero controlado. c) Residuos procesados previamente en alguna de las modalidades indicadas en este capítulo (recuperación, triaje, manual, incineración, etc.) que, lógicamente, entrarán en menor cantidad al vertedero controlado, pues han sido extraídas de ellos gran parte de las fracciones que los constituyen; o bien, han sido transformados y se llevan los residuos de esta transformación (escorias, inertes, etc.) al vertedero. | | | |
| (c) Procedimiento de excavación | a) Método de zanja o trinchera. b) Método de área. c) Cantera. d) Mixto de zanja y área. | | | |
| (d) Nivel de compactación | Tipo | Grosor de las capas de residuos | Densidad | Comentarios |
| | Alta densidad. | Muy bajo. | $>1 \text{ tm/m}^3$ | Problemas de insectos y roedores, de escorrentía, olores, presencia de materiales ligeros en el entorno, transportados por el viento. |
| | Densidad media. | 0,5-1,5 m | $0,5-0,9 \text{ tm/m}^3$ | Pocos lixiviados, fuerte evaporación. Problemas de insectos y roedores. Presencia de materiales ligeros por la misma causa que en el anterior. |
| | Baja densidad. | 1,5-3m | $<0,5 \text{ tm/m}^3$ | Se generan gases y lixiviados. Necesitan menos superficie que los anteriores. |

Tabla 2.4. Clasificación de los depósitos controlados. Fuente: Elaboración propia.

2.3.3 Impactos

En la figura 2.11, se presenta las principales fuentes de contaminación del vertido de residuos urbanos según la Escuela de Organización Industrial (EOI). Como se puede observar las principales fuentes de contaminación en un depósito controlado son el lixiviado y el biogás:

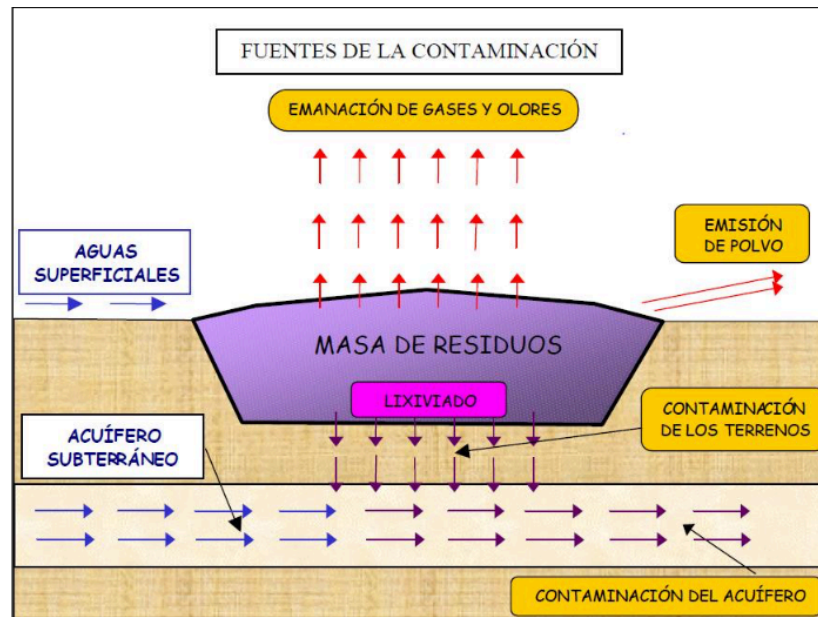


Figura 2.11 Mecanismos de contaminación del medio.
Fuente: Escuela de Organización Industrial (EOI)

- **Lixiviado:** Es el líquido contaminante (con composición química compleja) procedente de la percolación del agua a través los residuos urbanos depositados en las celdas de vertido. El lixiviado es el causante de la contaminación de los suelos y de las aguas superficiales y subterráneas. Para evitar esta fuente de contaminación, es imprescindible el buen diseño del sellado e impermeabilización de la base y los taludes; recoger las aguas superficiales mediante canalización; drenar, extraer y transportar los lixiviados del fondo del vaso hacia la planta de tratamiento. En el apartado 2.3.5, se profundiza acerca de este contaminante y de su sistema de gestión dentro de un depósito controlado.
- **Biogás.** El biogás es el gas resultante de la descomposición de la materia orgánica. El biogás está compuesto principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Estos dos gases tienen un gran impacto de efecto invernadero. Además, el biogás es una fuente de malos olores. Por otra parte, gracias a su contenido alto de metano (puede llegar hasta el 60% del volumen total), el biogás se puede revalorizar energéticamente. En el apartado 2.3.4, se profundiza acerca de este contaminante y de su sistema de gestión dentro de un depósito controlado.

En la tabla 2.5, se presenta un listado de impactos tanto positivos como negativos como consecuencia de la existencia de un depósito controlado. Cabe considerar que las repercusiones en la sociedad de un depósito controlado van más allá del medioambiente, la salud y de la higiene. La intención de este trabajo es aprender a realizar el ejercicio de ver de forma transversal los impactos que se genera por una u otra alternativa.

| Criterio | Impacto |
|----------------|--|
| Medioambiental | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Contaminación de acuíferos. ▪ Contaminación de aguas superficiales. ▪ Contaminación atmosférica. ▪ Contaminación odorífera. ▪ Emisión de polvo y partículas sólidas. ▪ Presencia de patogenicias. ▪ Degradación del paisaje. |
| Social | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rechazo social por parte de la ciudadanía próxima a su emplazamiento. ▪ Impacto en el tráfico en los viales próximos a su emplazamiento. ▪ Generación de empleo. |
| Económico | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Altos costes de construcción y clausura. ▪ Periodos de vigilancia post-clausura largos y costosos. ▪ Revalorización energética del biogás. |

Tabla 2.5. Impactos genéricos de un depósito controlado según criterios de sostenibilidad. Fuente: Elaboración propia.

2.3.4 Sistema de captación y tratamiento del biogás

Según la normativa europea sobre los vertederos (directiva 1999/31/CE), y la transposición a la legislación española (Real Decreto 1481/2001) obliga a la recogida y tratamiento del biogás:

“En todos los vertederos que reciban residuos biodegradables se recogerán los gases del vertedero, se tratarán y se aprovecharán. Si el gas recogido no puede aprovecharse para producir energía, se deberá quemar”.

Dada a su importancia legislativa, en los próximos apartados, se profundizará en el conocimiento del biogás y en los sistemas de captación.

2.3.4.1 Biogás

El biogás es un gas saturado de vapor de agua que se genera por la descomposición de la materia orgánica presente en los residuos urbanos mediante la acción bacteriana. El biogás está compuesto por los gases que se indican en la tabla 2.6. La cantidad y composición de este gas depende de la masa depositada de residuos; la composición y el tipo de desecho orgánico; su estado y las condiciones del medio. La evolución del proceso de formación del biogás en los depósitos controlados tiene las fases que se describen en la figura 2.12 y tabla 2.9.

| COMPOSICIÓN BÁSICA DEL BIOGÁS | |
|-------------------------------|--------------|
| Componente | % en Volumen |
| CH ₄ | 50-65 |
| CO ₂ | 30-45 |
| O ₂ | 0,1-5 |
| H ₂ | 0,1-2 |
| Metales | 0,7-1,6 |

Tabla 2.6. Composición básica del biogás.

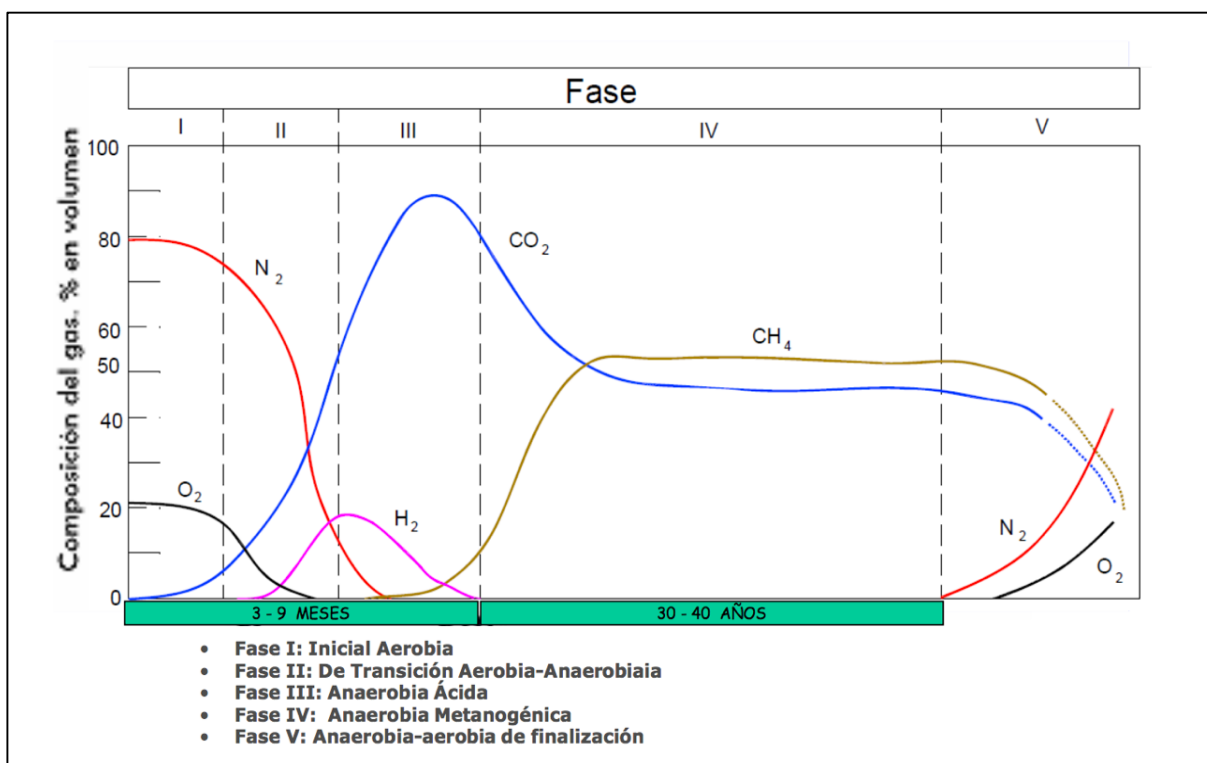


Figura 2.12 Evolución del proceso de formación de biogás en un vertedero de RU.
Fuente: Tchobanoglous, 1993.

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

| Fase | Características |
|---|---|
| 1) Inicial aerobia | <ul style="list-style-type: none"> • Inmediatamente después del vertido. • Gran influencia del N_2. • Aumento progresivo del CO_2. • Los microorganismos aerobios consumen el oxígeno disponible y la humedad de la basura. Descenso progresivo del O_2. |
| 2) Fase de transición | <ul style="list-style-type: none"> • Predomina el cambio de bacterias aerobias a anaerobias. • Descenso del N_2 • Se agota el oxígeno y empiezan a aparecer los AVT. |
| 3) Fase anaerobia con ausencia del CH_4 | <ul style="list-style-type: none"> • Aumento intenso del CO_2. • Agotamiento del N_2. • El pH empieza a bajar al tiempo que los residuos se convierten en AVT. |
| 4) Fase aerobia con formación de CH_4 | <ul style="list-style-type: none"> • Aumento progresivo del CH_4 hasta llegar a los valores máximos de su producción. • El pH vuelve a tener valores neutros. • Comienza esta fase aproximadamente al año de la deposición de los residuos. |
| 5) Fase final | <ul style="list-style-type: none"> • Disminución progresiva de la generación del biogás. • Disponibilidad de materia orgánica y nutrientes limitada. • Se estabiliza la composición del lixiviado. • Continúa la degradación lenta de la materia orgánica más recalcitrante. |

Tabla 2.7. Fases de formación del biogás en un depósito controlado. Fuente: Elaboración propia.

La producción del biogás en un depósito controlado depende de numerosos factores tal como se describen a continuación:

a) Composición de residuos

Es el factor más importante; pues el máximo potencial de generación de biogás depende del porcentaje de residuos orgánicos sobre el total, además del tipo de desecho orgánico, pues estos son la fuente de producción de biogás.

b) Densidad de residuos y tamaño de las partículas

Esto afecta al transporte de nutrientes y humedad en el relleno. La presencia de partículas pequeñas favorece el transporte, lo que aumenta la tasa de formación de biogás.

c) Temperatura

La temperatura de un depósito controlado es mayor que la ambiental; debido a que ocurren reacciones exotérmicas en su interior. De este modo, la temperatura influye en el tipo de bacteria que es predominante; y, en consecuencia, la tasa de generación de biogás. Se observa que a bajas temperaturas disminuye la tasa. De modo que los rellenos sanitarios poco profundos, al verse su temperatura afectada mucho más por variaciones estacionales, presentan cambios significativos en la tasa de producción de biogás. El rango óptimo para la existencia de bacterias anaeróbicas es de 30°C a 41°C. En rellenos sanitarios con temperaturas por debajo de los 10°C se produce una drástica caída en la actividad de dichas bacterias.

d) Humedad

Ésta puede variar mucho según las distintas zonas del relleno sanitario. Bajos índices de humedad limitan la descomposición de los residuos y, por lo tanto, restringen la producción de biogás. El contenido óptimo de humedad para la producción de biogás es de 50% a 60%. El contenido de metano del biogás aumenta también con la humedad; sin embargo, altos contenidos de ésta crean problemas con el sistema de captación, inundando las chimeneas.

e) pH y nutrientes

La generación de metano en rellenos sanitarios es máxima cuando existen condiciones de pH neutro. El pH tiene un profundo efecto en la actividad biológica, así, por ejemplo, un pH bajo 6.0 es considerado perjudicial para las bacterias metanogénicas. El pH óptimo durante la formación de metano es en el rango de 6.5 a 8.0 [8]. El ecosistema anaeróbico necesita de una serie de nutrientes; entre los que destacan el nitrógeno y fósforo; siendo este último el que tiene mayor posibilidad de escasear.

f) Condiciones atmosféricas

Es importante considerar las condiciones atmosféricas; especialmente, las precipitaciones. La topografía de la zona es clave, puesto que no son deseables pendientes pronunciadas por el efecto erosional que se produce junto con las lluvias. Las precipitaciones son la mayor fuente de humedad para un relleno sanitario, que además de contribuir a la producción de biogás, favorecen la “impermeabilización” del terreno impidiendo el ingreso de aire por grietas.

g) Cobertura

El recubrimiento diario tiene una serie de efectos en el relleno sanitario; ya que evita el contacto de los desechos con el oxígeno, permitiendo que se consigan condiciones anaeróbicas; además, reduce la entrada de aguas pluviales. Que

los residuos sean o no cubiertos diariamente determinará el tipo de reacción biológica que tendrá lugar en el relleno sanitario. Una producción óptima requiere condiciones anaeróbicas y, por lo tanto, recubrimiento diario. El espesor debe impedir que la temperatura de la basura se vea afectada por las condiciones meteorológicas y obstaculizar el ingreso del aire.

h) Edad de los residuos

Una vez que las condiciones anaeróbicas se establecen; la generación de biogás es significativa durante los primeros 10-20 años. Los rellenos sanitarios con varias décadas tienen menos probabilidad de producir grandes cantidades de biogás; pues, la mayor parte de las descomposiciones biológicas ya han ocurrido. La producción de biogás no es constante a lo largo del tiempo. Se considera que los gases se emiten en cinco fases secuenciales que serán descritas en la siguiente sección.

El biogás puede constituir un peligro en los vertederos; pues se desplaza entre los huecos y puede formar bolsas; lo que plantea posibles problemas de incendios en días de alta temperatura y de explosiones si se alcanzan concentraciones críticas del CH_4 , que reaccionará con el oxígeno del aire.

En general y de forma orientativa, la producción normal de biogás puede rondar en el orden de los 80-100 m^3 de gas por tonelada de residuo urbano depositada en el vertedero. Y esta producción puede mantenerse a lo largo de 8-10 años. Pero hay que tener en cuenta que puede llegar a acercarse a 400 m^3 de biogás/tm de residuos urbanos en momentos puntuales.

Cabe destacar que el metano presente en el biogás de vertederos es considerado como una de la más importantes fuentes de emisiones de efecto invernadero, tanto en la unión europea como a nivel mundial. Así pues, la reducción de las emisiones difusas de biogás de vertedero constituye una medida altamente eficiente para la reducción de dichos gases. Para ello es necesaria la implantación de sistemas de captación, tratamiento y eliminación del biogás.

2.3.4.2 Sistema de extracción del biogás

La captación del biogás debería iniciarse en cuanto las primeras fracciones de biogás se produzcan para garantizar la ausencia de emisiones difusas y los impactos derivados de la presencia del biogás. Para ello, parte de los elementos de captación y transporte deberán ya colocarse con antelación a la entrada en funcionamiento del vertedero y deberán irse implementando a medida que avance la explotación del mismo. Muchas veces los estudios de extracción durante las primeras fases de generación nos sirven para rediseñar el proyecto inicial adaptándolo a la realidad productiva del vertedero.

Durante las primeras fases, con una metanogénesis poco implantada, no deben plantearse sistemas de valorización energética si no solamente la combustión del “gas pobre” en antorcha para evitar las emisiones difusas a la atmósfera. Por otro lado, en la fase de clausura y postclausura hay que seguir prestando atención a la problemática de la captación incluso en ausencia de recuperaciones energéticas.

El aprovechamiento del biogás se realiza instalando una red global (Ver figura 2.13) de captación mediante drenajes con tuberías apropiadas perforadas con agujeros o con ranuras (red de transporte primario y secundario), pozos de captación (Figura 2.14a), sistemas de captación perimetral y horizontal, estaciones de regulación (Figura 2.14b), red de transporte primaria y secundaria; y, la planta de aspiración y combustión.

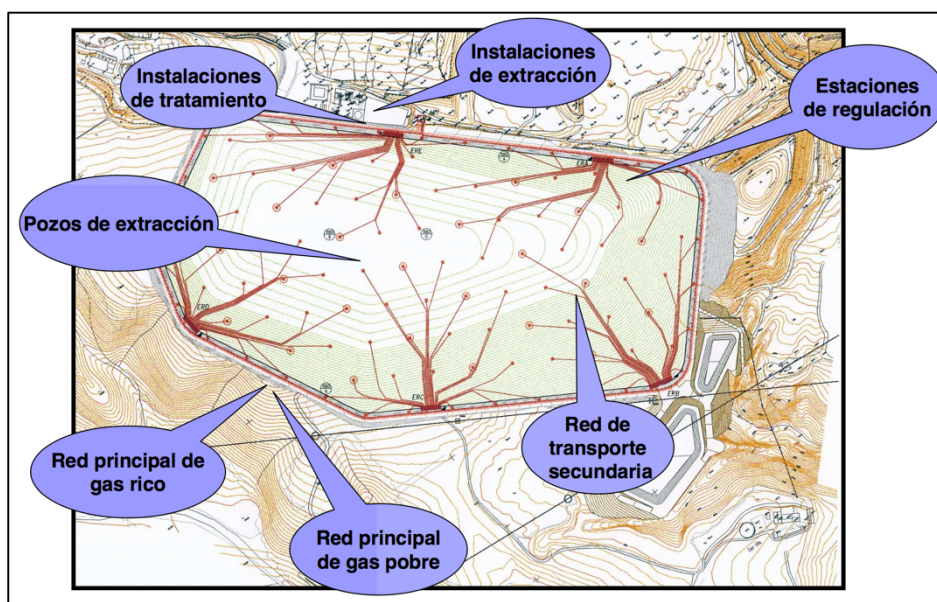


Figura 2.13. Elementos del sistema de extracción del biogás. Fuente: Ferrovial Servicios.



Figura 2.14. A la izquierda, pozo de captación de biogás. A la derecha, estación de regulación del sistema de captación. Fuente: Wikipedia.

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

En un sistema de captación de biogás es importante considerar el sistema de transporte que puede ser: en serie, en paralelo o en anillo; mostrándose a continuación las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas:

- a) El sistema en serie (Figura 2.15) conecta varios puntos de captación en una única “rama”; mientras que la regulación de la red se realiza directamente en el cabezal del pozo. Dicho sistema es económico, poco complicado, pero exige un mayor esfuerzo desde el punto de vista de gestión para alcanzar un buen nivel de regulación.

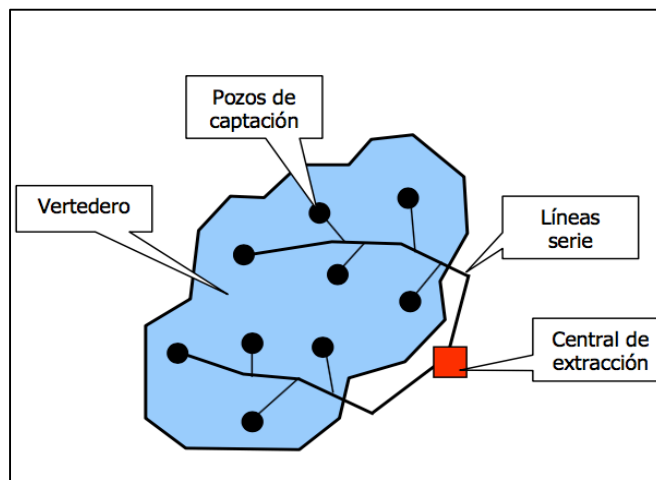


Figura 2.15. Esquema sistema de transporte del biogás en serie. Fuente: Ferrovial Servicios.

- b) El sistema en paralelo (Figura 2.16) conecta cada pozo a una estación de regulación colocada en un punto adecuado. En la estación de regulación se realizan todas las operaciones de monitorización y regulación. A su vez, cada estación de regulación está conectada, en serie o en paralelo, a la central de extracción.

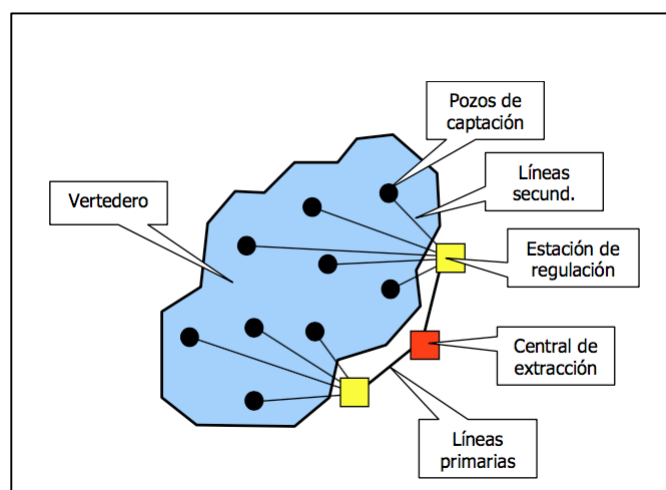


Figura 2.16. Esquema sistema de transporte del biogás en paralelo. Fuente: Ferrovial Servicios.

El sistema en paralelo es más costoso que el “en serie”, pero exige un menor esfuerzo desde el punto de vista de gestión y proporciona mejores prestaciones extractivas. Además, el sistema en paralelo permite una mejor automatización.

- c) El sistema en anillo: (Figura 2.17) prevé la realización de un colector anular a lo largo del perímetro del vertedero; a dicho colector se conectan los pozos. A su vez, el anillo está conectado a la central de extracción que aplica su depresión en las dos ramas no separadas.

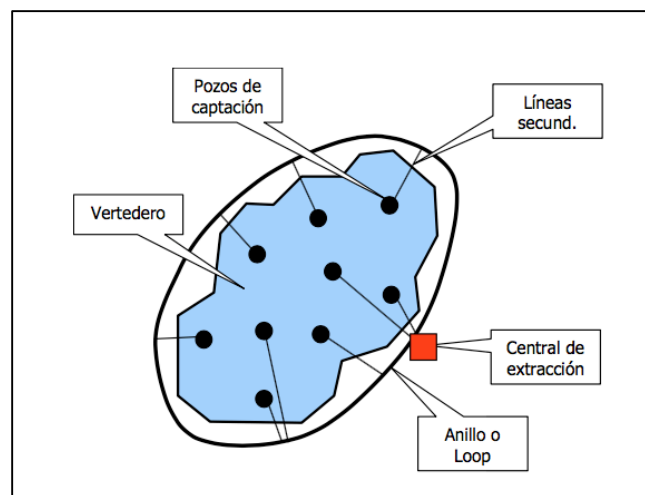


Figura 2.17. Esquema sistema de transporte del biogás en anillo. Fuente: Ferrovial Servicios.

El sistema de anillo es un compromiso entre los dos sistemas descritos (en serie y en paralelo). Es particularmente indicado en las fases de explotación del vertedero ya que reduce la presencia de líneas secundarias en las zonas de explotación.

2.3.4.3 Sistemas de valorización energética del biogás

Las tecnologías de valorización energética del biogás pueden ser, o bien, para la generación de energía eléctrica o, bien, para utilización directa como combustible:

- a) Generación de energía eléctrica:
- Motogeneradores.
 - Turbinas de biogás.
 - Pilas de combustible.
- b) Depuración y utilización directa como combustible:
- Combustible en calderas de biogás.
 - Inyección a la red de gas natural.

- Combustible para automoción.
- Combustible para alimentación de hornos industriales.

La valorización más frecuente es, con gran diferencia, la generación de energía eléctrica en motogeneradores; suelen tener rendimientos eléctricos del 30-40%.

2.3.4.5 Vertederos biorreactores

Un vertedero biorreactor es un vertedero adaptado para estabilizar la materia orgánica biodegradable en un plazo más corto de tiempo (entre 5 y 10 años) frente a los más de 30 años que duran los vertederos convencionales. En la tabla 2.8, se describe las ventajas e inconvenientes de la modificación de un vertedero tradicional a un vertedero biorreactor.

| | |
|-----------------------|--|
| Ventajas | <ol style="list-style-type: none"> 1) Reduce la edad del vertedero de 30 a 10 años. Por tanto, se reducen los costes de mantenimiento. 2) Mayor aprovechamiento del biogás, mayor rentabilidad energética. 3) Se reduce la carga de efecto invernadero por la reducción de la emisión del CH₄ y CO₂ en la atmósfera. 4) El poder contaminante del lixiviado es eliminado parcialmente con lo que se reducen los costes de tratamiento del lixiviado. 5) Se reduce el asentamiento en torno al 10-20% con lo que reutiliza el espacio para depositar más residuos. |
| Inconvenientes | <ol style="list-style-type: none"> 1) Incremento de los costes iniciales del diseño, construcción y operación del biorreactor con respecto a los convencionales. 2) Requiere mayor seguimiento técnico para controlar la adición de lixiviado, la estabilidad del vertedero y la generación del biogás. |

Tabla 2.8. Ventajas e inconvenientes del vertedero biorreactor respecto al convencional. Fuente: Elaboración propia.

El objetivo es acelerar el proceso de degradación de los residuos orgánicos que tiene lugar en el interior de las plataformas de vertido como consecuencia de procesos de microbiológicos. Para llevar a cabo esa optimización, se añaden líquidos y/o aire de forma controlada.

Hay tres tipos de vertederos biorreactores en función de la reacción que se lleve a cabo:

- 1) **Aerobio:** En un vertedero biorreactor aerobio, el lixiviado se elimina de la capa inferior; se conduce a los tanques de almacenamiento de líquidos; y se recircula en el relleno de una manera controlada. El aire se inyecta en la masa

de residuos utilizando pozos verticales u horizontales para promover la actividad aeróbica y acelerar la estabilización de los residuos.

- 2) **Anaerobio:** En un vertedero biorreactor anaerobio, se añade humedad a la masa de vertido mediante la recirculación de lixiviados y otras fuentes para obtener niveles óptimos de humedad. El líquido se inyecta en la masa de residuos utilizando diversas técnicas, que se verán más adelante; entre las que destacan los pozos verticales y los pozos horizontales. La biodegradación se produce en ausencia de oxígeno (anaeróbico) y se produce el gas de vertedero. El biogás, principalmente metano, puede ser capturado para reducir al mínimo las emisiones de gases de efecto invernadero y para proyectos de generación de energía.
- 3) **Híbrido:** En un vertedero biorreactor híbrido, se acelera la degradación de los residuos mediante el empleo de una secuencia de tratamiento aeróbico-anaeróbica de rápida degradación orgánica en las secciones superiores del relleno sanitario y recoger el gas en las secciones inferiores.

2.3.5 Sistema de gestión del lixiviado

2.3.5.1 Lixiviado

El lixiviado es el líquido que se genera del proceso de percolación del agua dentro de las celdas de un depósito controlado; pasa a través de los residuos disolviendo los compuestos orgánicos e inorgánicos hasta llegar a la capa de sellado (Ver figura 2.18). El lixiviado tiene un potencial muy contaminante. Y una fuga de este lixiviado en el sistema de impermeabilización podría causar la contaminación del subsuelo y de las aguas subterráneas. Por lo tanto, es vital, en el diseño de un depósito controlado, el sistema de captación, transporte y tratamiento de los lixiviados.



Figura 2.18. Lixiviados. Fuente: Desatascos Cubacas.

La composición del lixiviado de un vertedero puede llegar a ser muy compleja; pero, existen unas características químicas que son más o menos comunes en la mayoría de ellos, como son:

- a) Abundancia de sustancias hidrocarbonadas solubles.
- b) Abundancia de nitrógeno orgánico y amoniacal.
- c) Presencia de metales pesados, como Cd, Ni, Zn, Pb, etc.
- d) DQO de hasta centenares de mg de O₂/l.
- e) Salinidad muy elevada.

Los lixiviados se pueden formar de cuatro formas diferentes:

- 1) A partir del agua de precipitación que cae directamente sobre los residuos.
- 2) Agua de escorrentía superficial que llega directamente a la zona donde se ubica el vertedero.
- 3) Contacto directo de las aguas subterráneas con los residuos sólidos, por ascensión del nivel piezométrico.
- 4) Aporte o derrame de líquidos contaminantes en la zona de vertido.

Por otro lado, los lixiviados se clasifican en 3 clases en función del rango del pH, la carga orgánica y la relación entre DBO y DQO tal y como se presenta en la tabla 2.9:

| CLASE I | CLASE II | CLASE III |
|---------------------------------|---|--|
| $pH < 6,6$ | $6,5 < pH < 7,5$ | $pH > 7,5$ |
| Carga orgánica elevada (70-90%) | Carga orgánica media, del 10 al 30% debida a los ácidos grasos volátiles. | Carga orgánica baja; no hay ácidos grasos volátiles. |
| $\frac{DBO}{DQO} > 0,3$ | $0,3 > \frac{DBO}{DQO} > 0,1$ | $\frac{DBO}{DQO} < 0,1$ |

Tabla 2.9. Clasificación de los lixiviados.

Como elementos principales que suelen constituir el sistema de captación y transporte de lixiviados se incluyen los siguientes: capa de drenaje, sumidero, bombas sumergibles, tuberías de bombeo, caseta de bombeo de lixiviado, tubo colector de lixiviado y tuberías de transporte a la balsa de lixiviado.

2.3.5.2 Sistema de captación de los lixiviados

El sistema de captación de los lixiviados está formado por una capa drenante y una red de captación que se describen en mayor profundidad a continuación:

- a) **Capa drenante:** La capa de drenaje se colocará tal y como indica el RD 1481/2001 sobre de la barrera geológica en los Depósitos Controlados de Residuos inertes o sobre el revestimiento artificial impermeable (paquete de geosintéticos) en los Depósitos de Residuos Peligrosos y de No Peligrosos. En estos últimos el grosor de la capa nunca será inferior a 0.5 m, utilizando preferentemente gravas silíceas, ya que las gravas calcáreas pierden sus propiedades drenantes rápidamente por la degradación que producen las sustancias disueltas en los lixiviados. Esta capa de gravas drenantes va normalmente embutida entre láminas de geotextiles de alta densidad con tal de separar estas gravas de los residuos que se colocan encima y de la capa sellante inferior. En la figura 2.19, se muestra la colocación de la capa de gravas drenantes sobre el geotextil de alta densidad para la ampliación del depósito controlado de Orís (Osona).



Figura 2.19. Colocación de gravas drenantes del depósito controlado de Orís.
Fuente: Elaboración propia.

- b) **Red de captación:** La red de captación se ubica en el fondo de las celdas; dentro de la capa drenante (ver figura 2.20). Tiene el objetivo de conducir de manera más eficiente los lixiviados hasta la cota más baja de la celda donde se sitúa el sumidero de bombeo. Se diseña mediante tuberías ranuradas de polietileno de alta densidad (PEAD) en forma de “espina de pez”. En los puntos

bajos de cada celda se ubicarán los sumideros del sistema de recogida de lixiviados de fondo. El área basal de los sumideros suele ser aproximadamente de 5,0 m de longitud, 5,0 m de anchura y 0,9 m de profundidad, respecto al nivel de base del sistema de recogida de fondo. El sumidero se rellenará de grava como la utilizada en la capa drenante, pero de mayor diámetro, ya que se necesita un mayor coeficiente de permeabilidad para evitar que las bombas durante la extracción creen fuertes conos de depresión. El volumen de almacenamiento de los sumideros será suficiente para que las actividades de la bomba sean eficientes.



Figura 2.20. Red de captación dentro la capa drenante. Fuente: Elaboración propia.

2.3.5.3 Sistema de extracción y bombeo de los lixiviados

El sistema de extracción está formado por al menos un sumidero en cada celda de vertido. Desde cada sumidero parte un tubo de PEAD, normalmente de 630 mm de diámetro, hasta la cabecera del talud perimetral, que permitirá la introducción de la bomba sumergible por su interior hasta el fondo del sumidero para la extracción del lixiviado.

La sección del tubo que se apoya sobre la base del sumidero presentará sus paredes perforadas para que el lixiviado fluya a través del tubo y, de esta manera, poderlo bombear. La principal función de estos tubos es poder extraer las bombas para su mantenimiento y/o reparación en caso necesario.

Por ello, las bombas se instalarán sobre una estructura con ruedas con el fin de facilitar su extracción. Los extremos exteriores de los tubos de subida atravesarán las paredes de las casetas de bombeo de lixiviados. Esta estructura estará provista de un tubo que conectará las bombas que extraen el lixiviado de los sumideros con los tubos colectores. Además, un medidor de flujo y una válvula anti retorno se instalarán en

esta sección. El objeto del medidor de flujo es mantener un registro del lixiviado que se extrae de cada sumidero. El de la válvula anti retorno es evitar que el lixiviado fluya en dirección contraria al bombeo.

En ocasiones la morfología de las celdas de vertido permitiría realizar el diseño y la construcción de un sistema de extracción de lixiviados por gravedad construyendo un colector que atravesase el dique de cierre de la celda. Ésta opción no es nada recomendable, ya que existe un gran riesgo de rotura de la soldadura que se debe realizar entre la geomembrana de la impermeabilización de fondo y el colector de transporte que atraviesa el dique. Esta rotura podría ocasionar fugas de lixiviados con el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas adyacentes al Depósito Controlado.

La caseta de bombeo es un pequeño edificio que contendrá los elementos del sistema de extracción de lixiviados descritos con anterioridad como se presenta en la figura 2.21.



Figura 2.21. Caseta de bombeo de lixiviados. Fuente: Wikipedia.

2.3.5.4 Transporte de los lixiviados

El transporte de los lixiviados se realiza mediante un colector que transporta los lixiviados desde el tubo de bombeo hasta la balsa de almacenamiento de los lixiviados, mediante una tubería, tal como se señala en la figura 2.22:

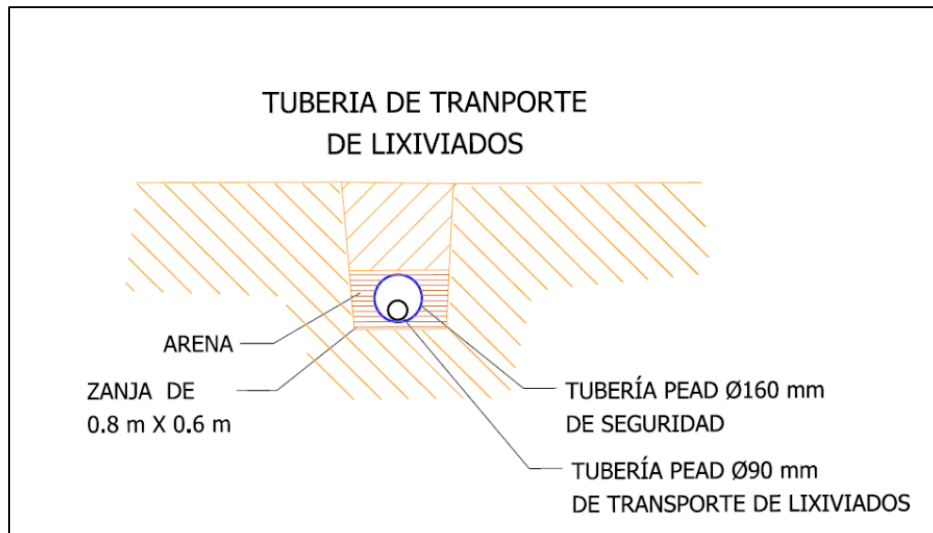


Figura 2.22. Sección tipo del transporte de los lixiviados. Fuente: Ricard Planas Vilardruga, (2014) "Projecte executiu de la fase VII del dipòsit controlat de residus".

En dicha figura se observa que este colector es una tubería de 90 mm de PEAD envainada de otra tubería de 160/200 mm de diámetro. De esta forma, si existiera una pérdida en la tubería interior, el lixiviado quedaría recogida por la tubería que le hace de vaina. Esta tubería va enterrada a un 1m de profundidad en una rasa de 0,6-0,8 m de ancho y recubierta de arena de protección.

Normalmente, cada 50 m de la canalización y/o coincidiendo con las casetas de bombeo a través de su recorrido, se suelen construir registros con el fin de comprobar la estanqueidad del colector y permitir la realización de tareas de mantenimiento.

2.3.5.5 Sistema de almacenaje de los lixiviados

El sistema de almacenaje es aquel depósito que recoge los lixiviados procedentes de la red de transporte para posteriormente ser tratados. Estos sistemas de almacenamiento pueden estar formados o bien por una balsa con un sistema de impermeabilización similares a los de la celda de vertido (como se ve en la figura 2.23), o bien por unos tanques contruidos con hormigón armado con materiales resistentes a la corrosión de los lixiviados y con la superficie interior impermeabilizada.



Figura 2.23. Balsa de almacenamiento de lixiviados. Fuente: Mapio.

2.3.5.6 Sistema de tratamientos de los lixiviados

Los lixiviados almacenados en las balsas o depósitos pueden tratarse en plantas propias de tratamiento (como la que se presenta en la figura 2.24), o bien transportarse a otras plantas para su tratamiento final (tratamiento externo).



Figura 2.24. Planta de tratamiento de lixiviados. Fuente: COGERSA.

La selección del proceso más adecuado para el tratamiento del lixiviado varía en función de las características del propio lixiviado, de su composición química, del medio receptor de los efluentes tratados, de los límites legales de vertido, de factores técnicos y aspectos económicos como la inversión y los costes de explotación.

En el momento que se requiere la instalación de una planta de tratamiento de lixiviado se debe realizar un estudio de viabilidad y seleccionar la mejor tecnología

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

disponible. Dada la complejidad química de los lixiviados, normalmente su tratamiento adecuado implica una combinación de distintas tecnologías. En la tabla 2.11 se presentan las distintas tecnologías disponibles de tratamiento de los lixiviados:

| Tratamiento | Tipos | Tratamiento | Tipos |
|-------------------|---|------------------------|---|
| Térmico | Secado. Evaporación Evapocondensación. | Membranas | Ósmosis inversa. Ósmosis directa. Filtración. Ultrafiltración. |
| Biológicos | Fangos activos. Lechos bacterianos. Biodiscos. Lagunajes. Otros como SBR; MBR,... | Físico-químicos | Carbón activo. Oxidación. Ozonización. Precipitación. Coagulación floculación. Electrodiálisis. Stripping Amoniaco. |

Tabla 2.11 Tipologías de tecnologías de tratamientos de lixiviados.

2.3.6 Emplazamiento

El factor del emplazamiento de un depósito controlado es una variable que tiene unas grandes repercusiones en todos los niveles: económicos, sociales y ambientales. Tomando como referencia las Directivas de la Unión Europea sobre el emplazamiento de un vertedero, se deben considerar siempre los siguientes aspectos técnicos del dimensionamiento de un vertedero:

- Control de las aguas de lluvia que penetran en el vertedero.
- Prevención de que las aguas tanto superficiales como subterráneas no entren en contacto con los residuos del vertedero.
- Interceptar y canalizar el agua y los lixiviados.
- Las aguas contaminadas han de ser captadas y depuradas convenientemente antes de su descarga final.
- El emplazamiento de un vertedero debe satisfacer los valores de permeabilidad y espesor de suelo siguientes:
 - Vertederos de residuos no peligrosos: $K \leq 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$. Espesor de 1m.
 - Vertederos de residuos peligrosos: $K \leq 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$. Espesor 5 m.
 - Vertederos de residuos inertes: $K \leq 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$. Espesor. 1 m.

- f) En función de las condiciones hidrogeológicas después de tener en cuenta el peligro potencial de contaminación, si fuera necesario, se procederá a instalar los sistemas de impermeabilización y sellado necesarios (geomembranas, capas de arcilla, etc.), con el propósito de impermeabilizar al máximo el sustrato del vertedero.

Desde el punto de vista social, encontrar un emplazamiento adecuado y aceptado por la sociedad se ha hecho cada vez más problemático en los últimos años. Los emplazamientos que han sido seleccionados, se enfrentan al rechazo de las administraciones locales y de los ciudadanos (se conoce como el efecto *Not in my backyard*, no en mi patio).

Un estudio realizado por la Universidad Católica de Nimega (Driessen, 1990) sobre la situación de Holanda ha revelado que, en la primera fase de la toma de decisión sobre los emplazamientos, los argumentos políticos tienen un carácter decisivo, mientras que los criterios de la ordenación territorial y de la higiene medioambiental tienen un papel secundario. A menudo, la aceptación política y social fueron los indicativos decisivos.

2.3.6.1 Criterios de selección de emplazamiento

Según el modelo KUN (Gijssberts, 1992) de la selección de emplazamientos para futuros vertederos, se distinguen entre 3 criterios: exclusión de zonas, delimitación de zonas, evaluar la idoneidad de zonas.

- 1) **Criterios para la exclusión de zonas:** Los planes para la ordenación territorial distinguen diferentes tipos de áreas donde el establecimiento de un vertedero es inaceptable, dadas sus características físicas o los puntos de partida para la política medioambiental y de ordenación territorial. Este es el caso de:
 - a. Núcleos urbanos.
 - b. Zonas residenciales.
 - c. Áreas Naturales.
 - d. Áreas y zonas naturales y protegidas.
 - e. Áreas de especial interés ecológico.
 - f. Aguas superficiales.
 - g. Los cementerios.
 - h. Aeropuertos.
- 2) **Criterios para la delimitación de zonas:** Tras la exclusión de áreas donde no se permite el establecimiento de vertederos, normalmente, queda una zona relativamente extensa en la cual se puede buscar un emplazamiento adecuado. El área de búsqueda se puede restringir aún más, empleando los criterios de idoneidad positiva y negativa. Los criterios de idoneidad positiva incluyen:

- a. La proximidad de una carretera, vía férrea o acuática.
- b. Proximidad de áreas urbanas donde se generan los residuos.

Los criterios de idoneidad negativa se refieren a zonas en donde en principio no se debería buscar un emplazamiento, aunque no se excluyen a priori. Se trata de áreas con características geológicas, hidrogeológicas y edafológicas desfavorables. En este aspecto es relevante: asentamientos, permeabilidad, presencia de aguas subterráneas y acuíferos, nivel freático.

3) **Criterios para la evaluación de zonas favorables:** Mediante la aplicación de criterios de eliminación y de delimitación; se obtiene, finalmente, una serie de emplazamientos posibles para la construcción de un vertedero. Estos emplazamientos pueden ser comparados y valorados en base a cinco diferentes tipos de criterios:

- a. Criterios de higiene medioambiental (incluyendo la geología, hidrogeología y edafología, molestias ocasionadas por olores, el polvo, el transporte y el riesgo para los vecinos).
- b. Criterios de organización territorial (como las distancias a zonas urbanas y la posibilidad de distribución de energía sobrante).
- c. Criterios referidos a la naturaleza y al paisaje (ecología, historia cultural, geografía y otros).
- d. Criterios económicos y financieros (costes de la compra de terrenos, preparación de los mismos, equipamiento técnico-medioambiental, transporte, explotación y seguimiento final).

2.3.6.2 Mapas de orientación para la ubicación de depósitos controlados

Para localizar la ubicación idónea de un vertedero de residuos urbanos, los mapas de orientación al vertido son una herramienta orientativa, y en su elaboración se considera exclusivamente la protección de la calidad de las aguas subterráneas, especialmente las destinadas al abastecimiento urbano. Para su explicación, se ha creído oportuno tomar como modelo los mapas de orientación al vertido de residuos urbanos realizados por el Instituto Geológica Minero de España.

Estos mapas son orientativos, pues el emplazamiento definitivo de un vertedero requerirá un estudio de mayor detalle que determine concluyentemente la idoneidad del lugar considerado. En un mapa de orientación al vertido se delimitan tres zonas:

1. Zonas desfavorables al vertido:

- a) Áreas correspondientes a afloramientos de formaciones permeables por karstificación o fisuración.
- b) Áreas donde estos materiales no afloran directamente, y su recubrimiento no es lo suficientemente protector. Como dato de referencia, una capa de material impermeable sin fisuras de más de 5 m de espesor y de permeabilidad vertical inferior a los 10^{-10} m/s, evita la infiltración del agua de lluvia y proporciona una protección local, si bien el agua puede circular en la superficie y puede infiltrarse en zonas donde la formación impermeable no exista. Para calizas y dolomías que se encuentren bajo materiales terciarios o cuaternarios no completamente impermeables, se puede tomar como base de referencia el hecho de que unos 15 m de arenas muy finas o bien alternancias de arenas, limos y arcillas, representan una buena protección frente a ciertos contaminantes producidos por lixiviación de las basuras urbanas, siempre que la infiltración tenga lugar en régimen no saturado. Por esta razón se puede considerar que, si el espesor es inferior a 15 m., las formaciones fisuradas no están protegidas, y debe tomarse la zona como vulnerable, independientemente de la profundidad a que se encuentre la superficie piezométrica.
- c) Áreas donde afloran formaciones permeables por porosidad intergranular, en las cuales existan acuíferos aprovechables libre o semicautivos y en los que la zona no saturada no puede proporcionar la suficiente protección frente a la contaminación.
- d) Áreas de protección de captaciones para abastecimiento. Su forma y dimensiones se obtiene en función de las características del acuífero y del volumen de agua bombeado. Estas zonas se dibujan sin atenerse a criterios geométricos rígidos; envolviendo varias captaciones dentro de una misma área de protección, o incluso, considerando zonas desfavorables las áreas donde exista cierta concentración de pozos o sondeos de abastecimiento, en vez de estimar cada uno de ellos individualmente. En lo que respecta a los manantiales utilizados como fuentes de abastecimiento, ha de tenerse en cuenta también un perímetro de protección a partir de criterios semejantes a los anteriores.

2. **Zonas que requieren estudios complementarios:** Es el caso en que con los conocimientos que se poseen de sus propiedades, no es posible definir con garantía suficiente la vulnerabilidad del acuífero; y por lo tanto el riesgo de contaminación.

Corresponden a:

- a) Zonas con materiales fisurados con un recubrimiento que puede considerarse como protector de materiales de permeabilidad relativamente baja o impermeables.
- b) Terrenos con una zona no saturada cuyo espesor proporciona cierta protección. Se trata de acuíferos libres o semicautivos en formaciones porosas (permeabilidad intragranular) en los que la superficie piezométrica se encuentra relativamente profunda.
- c) Zonas vulnerables en las que el agua subterránea no se utiliza ni se va a utilizar en un futuro para abastecimiento urbano, sea por su calidad, por su situación en el esquema de flujo del acuífero o por su situación geográfica.
- d) Zonas poco estudiadas, pero en las que en un principio no es posible la existencia de captaciones de abastecimiento.

3. Zonas favorables al vertido:

- a) Áreas donde afloran formaciones impermeables bajo las que no existen acuíferos utilizables.
- b) Áreas donde afloran formaciones impermeables bajo las cuales existen acuíferos utilizables, pero cuyo espesor y compacidad sean tales que hagan imposible la infiltración de agua desde la superficie del acuífero.
- c) Áreas poco permeables, donde, a pesar de que existan algunos pozos, las aguas subterráneas carecen de importancia, excepto en los casos en que haya manantiales o pozos de abastecimiento.
- d) Áreas bajo las cuales el agua subterránea se encuentra total e irreversiblemente contaminada con cantidades totales de sales en disolución superiores a los 5.000 mg/l. Por irreversible ha de entenderse que, dado el esquema de circulación del acuífero y el empleo del agua del mismo acuífero, no es de prever, al menos en un plazo de 20 años, que la calidad del agua subterránea se regenere a niveles inferiores a los 2.000 mg/l de sales disueltas.

2.3.7 Suelo e hidrología

Una de las condiciones más importantes que se exige a un vertedero es que éste siga siendo controlado y controlable a lo largo del tiempo. Para cumplir con esta condición se debe disponer, al menos, de los conocimientos suficientes sobre suelos y aguas, dado que a través del suelo y de las aguas subterráneas y superficiales ciertos compuestos procedentes del vertedero pueden migrar hacia su entorno. Con los conocimientos suficientes de suelos y aguas se puede estimar los riesgos para la

higiene medioambiental provocados por la migración de compuestos procedentes del vertedero. Por este motivo estos conocimientos son de gran importancia para la determinación de los emplazamientos.

Las condiciones de suelo y agua pueden ser evaluadas mediante el estudio de diversos aspectos del suelo e hidrológicos que se detallarán en la tabla 2.13. Como se puede observar se hace distinción entre agua subterránea y superficial porque determinados compuestos procedentes del vertedero pueden migrar, tanto a través de las aguas subterráneas como de las superficiales. El agua de lluvia, las aguas residuales y los lixiviados se vierten principalmente en aguas superficiales o en el alcantarillado. En el caso de una fuga por el sellado de la base, los compuestos pueden alcanzar el agua subterránea y migrar hacia el entorno del vertedero.

En la tabla 2.12 se presentan los aspectos relevantes y su importancia para los tres condicionantes: suelo, aguas subterráneas y aguas superficiales. Dichos aspectos están recogidos en la *Guía de Vertederos, Grupo EP, 1999*.

2.3.8 Sellado de la base

Un vertedero o depósito controlado es una infraestructura que tiene como objetivo evitar, en la mayor medida posible, tanto a corto como a largo plazo, que los residuos vertidos ocasionen un impacto al medio ambiente. Esto significa que el sistema de aislamiento o protección constituye el elemento más importante del proyecto.

La función del sellado de la base es, en primer lugar, evitar una emisión de compuestos hacia el suelo durante el vertido y hasta el momento de la instalación del sellado superior. Para el cumplimiento íntegro de esta función el tiempo necesario estimado es de, al menos, 30 años. Después de la instalación del sellado superior éste asume gradualmente la función de limitar las emisiones hacia el exterior.

| Condicionante | Aspectos relevantes | Importancia |
|---------------|--|--|
| Suelo | Asentamientos (para suelos problemáticos) | Determinación de posibles daños en el sellado de la base. Posibles daños por alteraciones hidrogeológicas causadas por los vertidos. Accesibilidad para el tráfico del emplazamiento. Determinación altura del vertedero. |
| | Posibilidad de rotura (para suelos de baja capacidad portante) | Diseño de construcción de taludes, bermas, ... |

| | | |
|---------------------|----------------------------------|---|
| | Tipo del suelo | Evaluación de las posibilidades de migración de compuestos en la parte superficial del suelo. |
| | Altimetría | Posibles hundimientos de la superficie. Altura del vertedero y balance de tierras. |
| | Estratificación del suelo | Determinación de velocidad de flujo del agua subterránea y la migración de compuesto. Necesario para calcular asentamientos. |
| | Permeabilidad | Determinar las protecciones hidrogeológicas y cálculos de migración. |
| Aguas subterráneas | Estructura hidrogeológica | Determinación de flujos de aguas subterráneas y de migración de compuestos. Diseño del sellado de la base e instalación del equipamiento de control y seguimiento. |
| | Extracciones de agua subterránea | Predicción de las consecuencias para el sistema de flujos. |
| | Niveles freáticos | Cálculo del sistema de flujo de las aguas subterráneas y de los niveles freáticos. Determinación de la elevación de la base del vertedero (al menos 0,7m del NF). Determinación de la profundidad del sistema de control subterráneo (al menos 0,4 m del NF). |
| | Calidad | Análisis de muestras de aguas subterráneas. |
| Aguas superficiales | Drenaje | Determinación de la dirección de flujo de las aguas superficiales. Delimitación zona de influencia. Migración de posible contaminación desde el vertedero. |
| | Calidad | Comparación con valores de fondo. Investigación de la procedencia de posibles contaminaciones. |

Tabla 2.12 Aspectos relevantes del suelo, las aguas subterráneas y aguas superficiales.

Según la “Directiva 1999/31/CE, del Consejo, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos”, las barreras de protección mínimas de que dispondrán los vertederos bajo la masa de residuos y las condiciones mínimas a exigir a dichas barreras serán las que para cada clase se reflejan esquemáticamente en la figura 2.25.

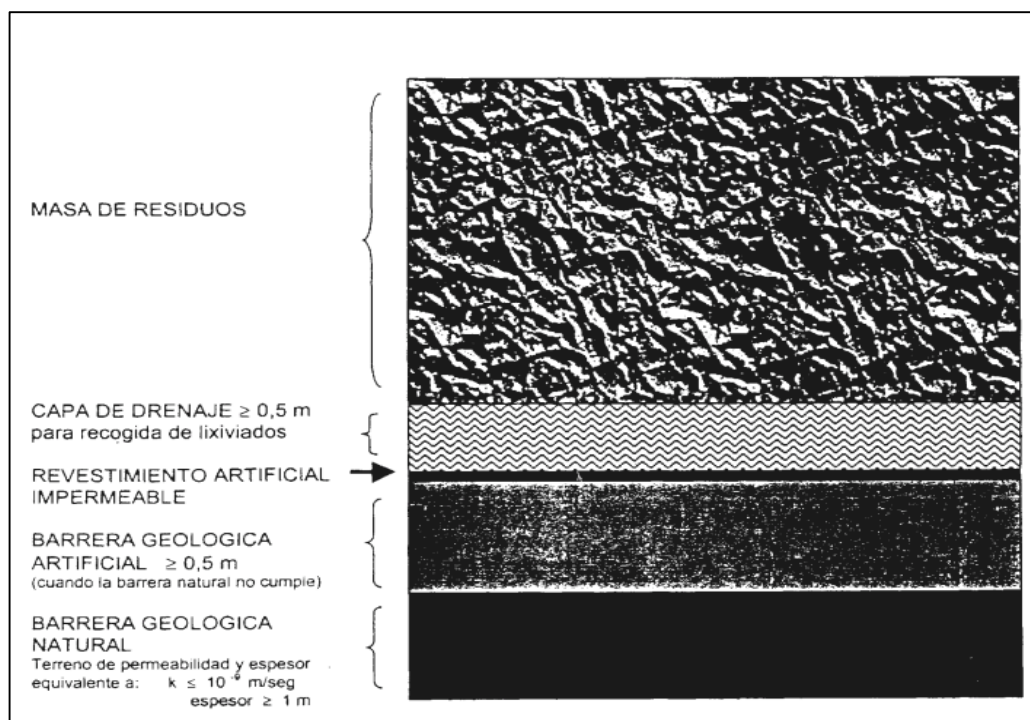


Figura 2.25. Protección mínima de los depósitos controlados de residuos no peligrosos. Fuente: BOE.

El grado de protección de la base depende principalmente de 3 aspectos: las características hidrogeológicas, las características del suelo y la construcción del sellado. Para determinar un cierto nivel de control de protección existe una situación de referencia que se debe cumplir y hay unas condiciones inadecuadas que se deben evitar, tal como se muestra en la tabla 2.13.

| | |
|--------------------------------|---|
| Situación de referencia | <p>Se puede asegurar un adecuado coeficiente de seguridad frente a la rotura del sistema vertidos-subsuelo.</p> <p>Los asentamientos del subsuelo, como consecuencia de la carga generada por los residuos vertidos son menores a 0,25m.</p> <p>Existe una situación de flujo de aguas subterránea limitada.</p> <p>La base del vertedero debe estar al menos a 0,7m por encima del NFMA.</p> <p>Los drenes de control desembocan a un nivel inferior al del NF.</p> <p>Por debajo del vertedero, el espesor del acuífero es relativamente reducido (como máximo de 10m).</p> |
| Situación inadecuada | <p>Si existe la posibilidad de fallo en la construcción por la deformación o la inestabilidad del subsuelo.</p> <p>Si se genera o existe la posibilidad de que se produzca una situación incontrolable por fallos de la construcción.</p> <p>Si no es posible el control de la eficacia de la construcción.</p> |

Tabla 2.13. Situación de referencia y situación inadecuada de la protección de la base de los depósitos controlados.

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

En los casos que no se cumpla con los criterios de referencia, la Guía de Vertederos (Grupo EP, 1999) considera siete casos anómalos de suelo que son bastante frecuentes en los Países Bajos, y que por lo tanto es necesario una modificación de la construcción. Los siete casos que se distinguen para el suelo y las consecuencias para la construcción del sellado de la base se describen en la tabla 2.14.

| Tipo de suelo | Descripción de la anomalía | Medidas correctoras |
|---------------------------------------|--|---|
| Suelo con posibilidad de rotura | Coefficiente de seguridad inferior al mínimo exigido | Sobreexcavación, sostenimiento del pie, suavización de taludes constructivos. |
| Suelo con posibilidad de asentamiento | Base del vertedero < 0,7 m por encima del NFMA, asentamiento < 0,5 m. | Elevación del terreno. |
| | Asentamiento > 0,25 y < 0,5 m | Reforzar la capa mineral mediante el aumento de su espesor; posiblemente mediante compactación previa, en combinación con otras medidas geotécnicas. |
| | Asentamiento > 0,5 m | Mejoramiento del suelo y/o compactación previa, en combinación en el reforzamiento de la construcción del sellado. |
| Áreas de infiltración de aguas | Zonas arenosas con un nivel freático relativamente poco profundo, o zonas de pólderes con riesgo de infiltración por puntos de extracción de agua colindante. | Áreas con subsuelo permeable: construcción tipo, posiblemente combinado con sistemas para interceptar fugas de lixiviados (aislamiento hidrológico). Subsuelo de baja permeabilidad: aplicación de una capa permeable entre el suelo original y la capa de sellado mineral. |
| Zonas con aguas emergentes | Nivel piezométrico de las aguas profundas más elevado que el nivel freático (p.e. en zonas arenosas bajas con capas de limo impermeables, o pólderes profundos). | Para zonas arenosas bajas se considera suficiente la construcción tipo. Pólderes con aguas emergentes: aplicación de la construcción tipo, posiblemente con incremento del espesor de la capa mineral. |
| Áreas hidrológicamente planas | En el subsuelo profundo no existe flujo de aguas, el nivel freático es relativamente alto. | Construcción tipo, detección de fugas con tuberías de drenaje por debajo del sellado o sistemas similares. |
| Excavaciones y canteras | Emplazamiento no apto, solo apto en el caso de una ampliación de un vertedero existente. | |
| Zonas arenosas | Alta permeabilidad del acuífero más superficial; nivel freático profundo. | Sellado y capa de drenaje adicionales. |

Tabla 2.14. Modificaciones en la construcción para emplazamientos diferentes de la localización de referencia.

Aparte de las modificaciones y alternativas para la construcción tipo, presentadas en la tabla 2.14, pueden ser necesarias otras medidas de aislamiento, o el refuerzo de la construcción, para mejorar o garantizar el funcionamiento del sistema.

| | |
|--|---|
| Capa de gravilla por debajo de la base del vertedero: | Esta capa puede frenar, hasta cierto punto, la difusión de compuestos si el espacio poroso está lleno de aire. Con el tiempo, una capa de este tipo puede funcionar como vía de transporte horizontal. |
| Capa de gravilla por debajo del sellado de la base del vertedero: | Esta capa puede frenar, hasta cierto punto, la difusión de compuestos si la situación que presenta como más frecuente es la de no contener agua subterránea. |
| Aumento del espesor de las capas minerales aislantes: | <p>El aumento del espesor de las capas puede considerarse conveniente en los siguientes casos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Se estiman grandes diferencias entre los asentamientos. 2) La capacidad auto sellante de la capa mineral se desgasta notablemente, tanto durante la fase de construcción como a largo de plazo. 3) La compactación u homogeneidad de la capa son insuficientes. 4) La degradación de la capa es probable por filtración de líquidos (aguas subterráneas o lixiviados). |
| Aumento del contenido de bentonita | A parte del aumento del espesor de la capa, o paralelamente al mismo, puede ser necesario el incremento del contenido de bentonita, particularmente si transcurre mucho tiempo entre la aplicación de las sucesivas capas, la construcción de capas con pendiente o si existe un control deficiente en los métodos de mezcla de los materiales que conforman la capa mineral. |

Tabla 2.15. Medidas de aislamiento, o el refuerzo de la construcción, para mejorar o garantizar el funcionamiento del sellado de la base.

2.4 CONCLUSIONES

Tratamientos residuos urbanos

En primer lugar, se ha observado, según los datos de Eurostat del 2013, que en España el 60% del peso de los residuos urbanos tiene como tratamiento finalista los depósitos controlados. Si lo comparamos con la media de la Unión Europea, este porcentaje es el doble (31%). Respecto a los datos con Alemania o Suiza, observamos que en estos países el vertido es prácticamente nulo y la destinación de los residuos urbanos son mediante procesos de valorización como la incineración, el reciclado y el compostaje.

No obstante, como ventajas respecto a los demás tratamientos finalistas, los depósitos controlados son la solución técnica más sencilla en comparación con los demás tratamientos finalistas y requieren una menor inversión inicial. Teniendo en cuenta el contexto histórico, que hasta la década de los 90 a nivel europeo no había una concienciación ambiental respecto a la gestión ambiental de los residuos urbanos; y que, a nivel nacional, en España, abundaban los vertederos incontrolados, razón por la cual, es entendible que, posteriormente, se iniciaran las soluciones de tratamiento finalistas con la construcción de soluciones más sencillas y económicas como los depósitos controlados.

Las desventajas de los depósitos controlados respecto a otros tratamientos son su elevado consumo del terreno; se enfrentan a un gran rechazo social por parte de la ciudadanía; contiene una alta cantidad de residuos que podrían haber sido valorizados y presenta una serie de múltiples impactos ambientales como la contaminación de acuíferos, contaminación de aguas superficiales, contaminación atmosférica, contaminación odorífera, emisión de polvo y partículas sólidas, presencia de patogenicias y degradación del paisaje. La mayoría de estos impactos ambientales son consecuencias de las sustancias contaminantes que se generan en mayor medida en los depósitos controlados: el biogás y los lixiviados. Por ello, es fundamental en un depósito controlado, el buen sellado e impermeabilización de la base, el buen diseño de la gestión del biogás y de los lixiviados.

En segundo lugar, se ha estudiado la importancia del buen diseño y funcionamiento del sistema de captación, tratamiento y eliminación del biogás, puesto que, el metano presente en el biogás de vertederos es considerado como una de las más importantes fuentes de emisiones de efecto invernadero, tanto en la unión europea como a nivel mundial. Así pues, la reducción de las emisiones difusas de biogás de vertedero constituye una medida altamente eficiente para la reducción de dichos gases.

En el caso de los depósitos controlados biorreactores, es decir, con gestión microbiológica que permite regular e incrementar la descomposición de la materia orgánica presente en los residuos urbanos; como ventajas: se reduce la edad de los depósitos controlados de 30 a 10 años; aumentan el aprovechamiento del biogás con lo que se obtiene mayor rentabilidad energética; reducen la carga de gases de efecto invernadero presentes en el biogás (metano y dióxido de carbono), permiten aprovechar entre el 10-20% del espacio para depositar residuos gracias al incremento de la descomposición de la materia orgánica. Y, como inconvenientes, requieren incrementos de costes iniciales del diseño, construcción y operación del biorreactor con respecto a los convencionales; y, requieren mayor seguimiento técnico para controlar la adición de lixiviado, la estabilidad del vertedero y la generación del biogás.

En el caso del tratamiento de los lixiviados de un depósito controlado, la selección del proceso más adecuado para el tratamiento del lixiviado varía en función de las características del propio lixiviado, de su composición química, del medio

receptor de los efluentes tratados, de los límites legales de vertido, de factores técnicos y aspectos económicos como la inversión y los costes de explotación. En el momento que se requiere la instalación de una planta de tratamiento de lixiviado se debe realizar un estudio de viabilidad y seleccionar la mejor tecnología disponible. Dada la complejidad química de los lixiviados; normalmente, su tratamiento adecuado implica una combinación de distintas tecnologías.

Emplazamiento del depósito controlado

Dada la importancia del emplazamiento de los depósitos controlados, se han estudiado dos modelos de selección: el modelo KUN(Gijsberts,1992) y el modelo de los mapas de orientación al vertido por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). El modelo KUN utiliza 3 criterios para la selección del emplazamiento de un vertedero.

En primer lugar, excluye aquellas zonas que urbanísticamente son inaceptables. En segundo lugar, delimita aquellas zonas donde se encontraría el depósito controlado cerca de vías de comunicación y de núcleos de generación de residuos. Y, en tercer lugar y último, evalúa las zonas según criterios medioambientales, de organización territorial, paisajísticos y económicos con tal de obtener el emplazamiento óptimo. El modelo de los mapas de orientación al vertido por el IGME, tiene un carácter más geotécnico-hidráulico y nos distingue entre 3 zonas de delimitación: las favorables al vertido, las desfavorables y aquellas que requieren estudios complementarios.

Sellado

En relación al sistema de sellado e impermeabilización, el grado de protección de la base depende de 3 aspectos principales: las características hidrogeológicas, las características del suelo y la construcción del sellado. Para determinar un cierto nivel de control de protección existe una situación de referencia que se debe cumplir y hay unas condiciones inadecuadas que se deben evitar. En el caso de encontrarnos en situaciones inadecuadas, proviene de medidas correctores en función de la anomalía.

CAPÍTULO 3

ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS

3.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior, se ha estudiado el proceso de la gestión de residuos, desde la recogida hasta el tratamiento, focalizándose al final en el estudio de los depósitos controlados.

Esta documentación nos servirá para proceder a estudiar, en el presente capítulo, las alternativas como posibles soluciones de los sistemas de impermeabilización para la tercera ampliación del depósito controlado de Orís (Barcelona). El estudio de las alternativas es necesario para proceder en los próximos capítulos a evaluarlas; con fin de obtener un resultado comparativo entre ellas mediante criterios de sostenibilidad.

Inicialmente, se contextualizará en qué condiciones de contorno nos encontramos ante el problema presentado para poder así detectar correctamente aquellos parámetros más fundamentales del estudio que tendrán mayor y menor peso en el estudio comparativo y cuáles no serán importantes porque no discriminarán entre las alternativas elegidas.

3.2 CONDICIONES DE CONTORNO

3.2.1 Introducció

En este apartado, se presenta la situación actual y las condiciones de contorno en las que se encuentra el depósito controlado de residuos urbanos no especiales (clase 2) de Orís, en la comarca de Osona, en la provincia de Barcelona. El estudio de las condiciones de contorno nos sirve para saber qué criterios o prioridades deberemos prestar atención ante el problema con tal de evaluar la solución de forma óptima desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Las alternativas de la evaluación de sostenibilidad son los sistemas de impermeabilización de la base de la tercera ampliación del depósito controlado de Orís. Esta ampliación está diseñada de forma ejecutiva en dos fases tal y como se presenta en la figura 3.1. Por otro lado, en la tabla 3.1, se presentan las características generales de la tercera ampliación del depósito controlado de Orís.

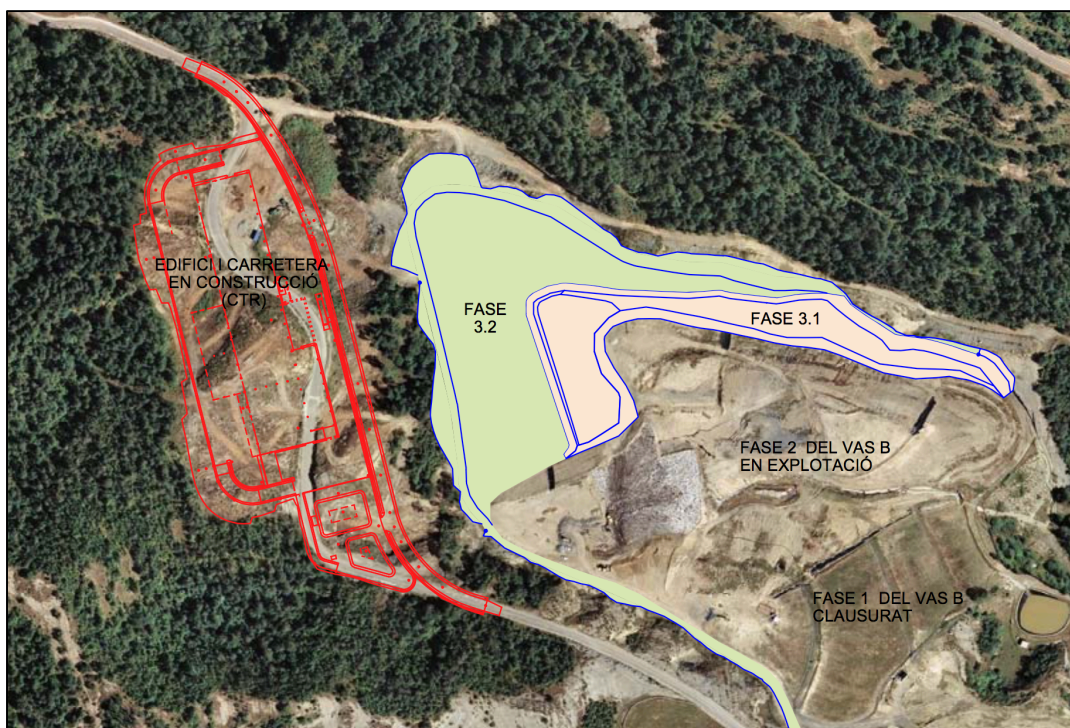


Figura 3.1. Ampliació de la tercera fase del depòsit controlat de Orís. Fuente: “*Projecte per la construcció de la tercera fase d’ampliació del Vas B*”.

| Características generales | Superficie (m ²) | Volumen neto (m ³) | Vida útil (años) | Coste (sin IVA) |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------|
| Fase 3.1 | 13.163 | 201.150 | 5,40 | 1.408.091,27 |
| Fase 3.2 | 22.838 | 349.683 | 9,38 | 2.834.745,81 |

Tabla 3.1. Características generales de la tercera ampliación del depósito controlado de Orís.

3.2.2 Situación territorial

Osona es una comarca con 1.245,2 km² (3,9% del total de Cataluña) y una población de 156.572 habitantes (2,1% del total de Cataluña). La comarca tiene una densidad de población de 125 habitantes / km², lo que hace que sea más densamente poblada que el conjunto de las comarcas centrales (84 habitantes / km²), pero menos que el conjunto de Cataluña (234 habitantes / km²). En el territorio, sin embargo, no existe un equilibrio poblacional. Osona tiene las ciudades 28^a y 64^a de Cataluña, Vic y Manlleu, con 43.964 y 20.007 habitantes respectivamente. Esto hace que el resto del territorio sólo tenga una densidad de población de 77 habitantes / km², similar a la de la Garrotxa.

A nivel de conectividad, Osona es una comarca bien conectada por la red viaria de Cataluña. Hay conexión hacia el sur con la C-17 hacia Barcelona, Vallès, el aeropuerto y el puerto, y hacia el norte con Ripoll Puigcerdà y Francia. Cuenta también con el eje transversal (C-25), que conecta Girona y Lleida, pasando por Manresa, y que enlaza la frontera francesa con la española. En la figura 3.2 se presenta el mapa de las conexiones de la comarca de Osona.

También cuenta con conexiones comarcales, como la que se hace a través de la C-63, que conecta con Berga desde donde se puede enlazar hacia la Seu d'Urgell y Andorra; y la que se hace a través de la C-37 que conecta Olot con Figueres y la frontera francesa.

Contrariamente, Osona no tiene una buena infraestructura ferroviaria. La R-3 de Cercanías, que transcurre de forma paralela a la C-17 por los principales municipios de la comarca como Vic, Manlleu y Torelló, tiene sólo una vía de circulación en ancho ibérico y sólo adaptada a la circulación de pasajeros. En este sentido, la conexión ferroviaria de mercancías es inexistente. La movilidad internacional es imposible para el ancho de vía y la capacidad de la vía de pasajeros es muy limitada en frecuencias por tener sólo una vía de circulación.

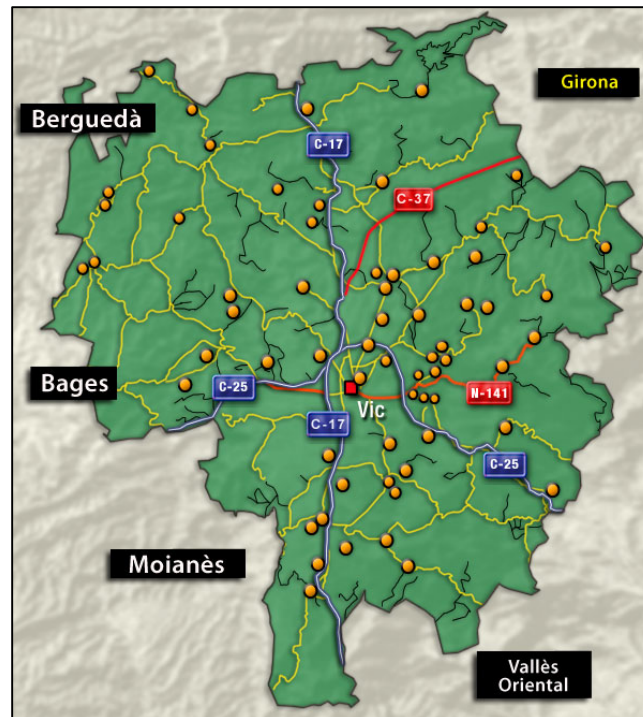


Figura 3.2 Mapa territorial de Osona. Fuente: Aldea Global.

3.2.3 Situación económica

Osona es una comarca con una tradición industrial muy arraigada; con una especialización muy enfocada al sector agroalimentario. Es por ello que las actividades predominantes en la comarca son: la industria cárnica, la ganadería, el comercio de productos alimenticios (sobre todo grandes superficies comerciales) y la restauración.

Además, hay un sector industrial consolidado alrededor del sector metal-mecánico y toda una red empresarial relacionada. Éstos dos sectores mantienen una red de actividades de apoyo vinculado a la logística y al transporte de mercancías por carretera; y, los servicios de limpieza impulsados a raíz de la recuperación económica por una externalización del servicio.

Como sectores emergentes hay que diferenciar aquéllos más demandados a partir de la crisis económica como los servicios sociales, las inmobiliarias para dar salida al stock inmobiliario acumulado antes de la crisis y aquellos vinculados al aumento de la innovación y el emprendimiento como: las TIC, los servicios relacionados con la educación y la salud.

Osona es una comarca con una fuerte concentración territorial de los puestos de trabajo. El 43,6% de puestos se localizan en Vic y Gurb. Y, el 73,8%, en los municipios del entorno de la C-17. En cambio, Osona mantiene una estructura más descentralizada en cuanto a la residencia de los trabajadores, aunque el 47,8% se localizan en las 3 grandes ciudades de la comarca: Vic, Manlleu y Torelló.

La conclusión a nivel económica es destacar la importancia de las infraestructuras viales tales como la C-17 y la C-25 que son vitales para la economía de las industrias y el comercio de la zona. Estas carreteras requieren de inversiones de mejora de accesos, mejora de las situaciones de las calzadas, con tal de mejorar el tránsito y reducir la siniestralidad como en el caso de las curvas de Figaró.

3.2.4 Situación social

En septiembre del 2017, según el Observatorio Socioeconómico de Osona, había en Osona 8.103 personas en paro de las que 4.735 eran mujeres y 3.368, hombres. En la figura 3.3, se presenta la evolución de la tasa del paro en la comarca de Osona desde 2008 hasta el 2017.

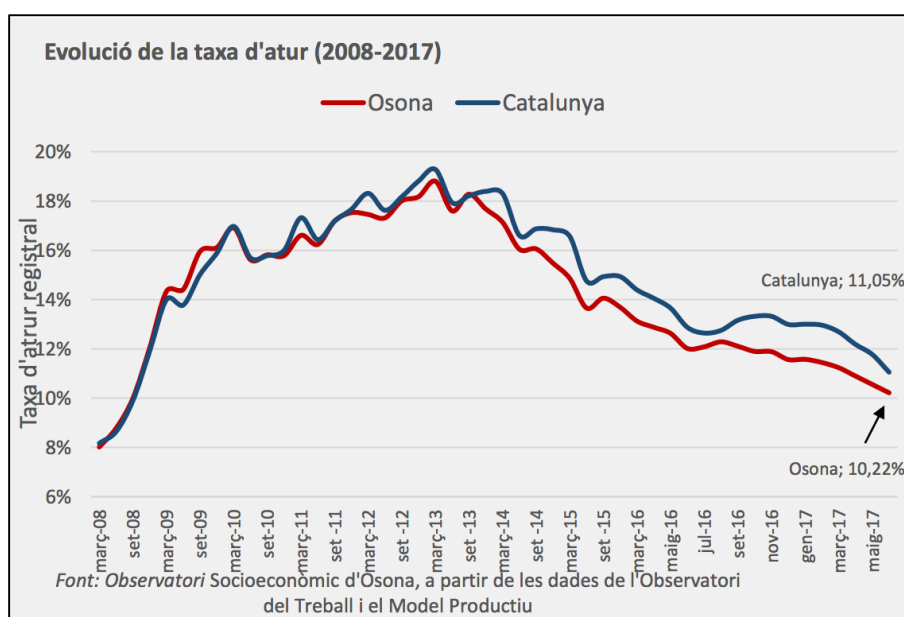


Figura 3.3. Evolución de la tasa de paro en Osona (2008-2017). Fuente: Observatori Socioeconòmic d'Osona.

En dicha figura se observa que la tasa de paro comarcal, del 10,40%, continúa su tendencia a la baja y se mantiene por debajo de la media de Cataluña (11,24%). En marzo del año 2013, fue el punto de inflexión en el que el número de parados comenzó a disminuir; aunque, no fue hasta octubre del 2013 cuando Osona comenzó a registrar una variación interanual negativa. Osona se posiciona como la tercera comarca con la tasa más baja de la demarcación de Barcelona por detrás del Moianès (8,37%) y el Barcelonès (10,25%), y también tercera en relación a las comarcas

vecinas.

Aunque los datos de la tasa de paro de Osona sea más positivos que la media catalana, si lo comparamos con otros países de la Unión Europea como se presenta en la figura 3.4, en la cual observamos que países como Alemania (3,5% de tasa de desempleo), Dinamarca (4,8%), Países Bajos (4,1%) se sitúan con valores de desempleo del orden de la mitad que la comarca de Osona.

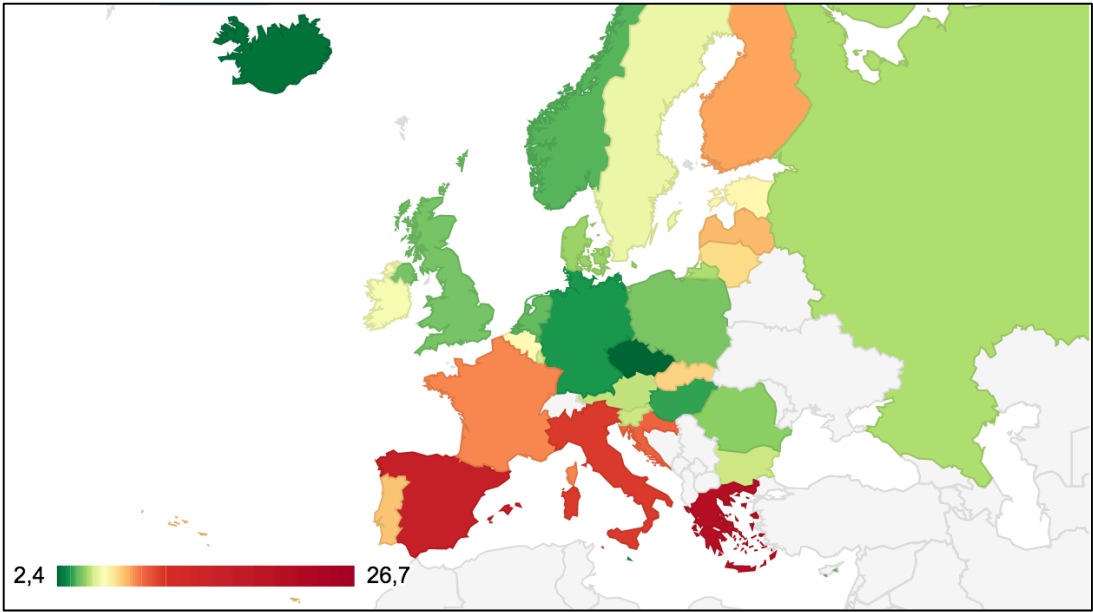


Figura 3.4. Tasa de desempleo países Europa 2018. Fuente: Datos Macro.

Analizando las figuras anteriores, vemos que nos encontramos en una situación adversa socio-económicamente para muchas personas. Por ello, es importante, de cara a la toma de decisión por parte de la Administración, considerar la generación de empleo de cada alternativa en el caso que sea discriminante entre las alternativas.

3.2.5 Situación ambiental

El depósito controlado de Orís da servicio a todos los municipios de la comarca de Osona (51). También desde finales del pasado año presta servicio a la comarca vecina del Ripollès (19 municipios). En total se trata de 172.156 habitantes.

A esta instalación le llega la fracción resto de la recogida municipal; es decir, se trata de un depósito solo para residuos urbanos domiciliarios. Como dato, el pasado año entraron alrededor de 47.000 toneladas de residuos al vertedero. No obstante, se está fomentando que los municipios implanten la recogida selectiva de las diferentes fracciones para que al depósito vaya la mínima cantidad posible de residuos, se alargue así su vida útil y, además, cumpla la normativa europea de restricción de

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

materiales biodegradables. De hecho, en la comarca de Osona, el porcentaje de recogida selectiva es alto comparativamente con otras comarcas de Cataluña; según datos de la Agència de Residus de Catalunya, en 2005 se recogieron selectivamente el 40,07% de los residuos urbanos domiciliarios.

3.2.6 Emplazamiento del depósito controlado de estudio

El depósito controlado de estudio está situado en la comarca de Osona en el municipio de Orís concretamente en la finca de las Sales; terrenos adquiridos por el “Consorti per a la gestió de residus urbans d'Osona” para la construcción del vertedero comarcal de residuos urbanos. La parcela dispone de una superficie disponible de 20 Ha. En la figura 3.5, se presenta el mapa de ubicación del emplazamiento de depósito controlado de Orís.

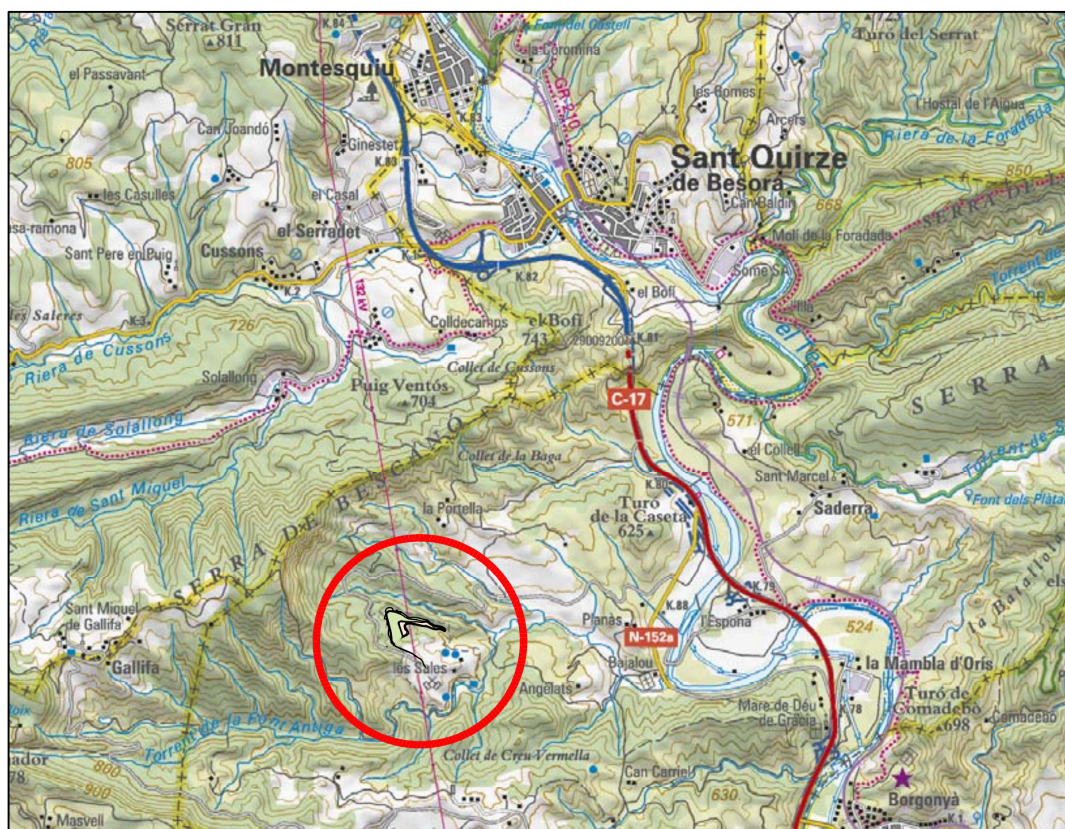


Figura 3.5. Emplazamiento del depósito controlado del depósito controlado de Orís. Fuente: “Projecte per la construcció de la tercera fase d'ampliació del Vas B”.

El depósito controlado (vertedero) recibe los residuos urbanos que no se pueden reciclar y que denominamos fracción resto. Entró en funcionamiento en 1995 y da servicio a todos los municipios de Osona; desde finales de 2006 también admite la fracción resto del Ripollès.

El depósito tiene 2 vasos: el vaso A ya clausurado y el vaso B, que se divide en tres fases: la primera está clausurada, la segunda fase está pendiente de clausura y desde abril de 2016 se está explotando fase 3.1. En la figura 3.6, se presenta la vista aérea del depósito controlado de Orís.



Figura 3.6. Vista aérea del depósito controlado de Orís. Fuente: Residus Osona.

El proyecto de ampliación prevé que la fase 3.1 tenga una vida útil de casi 5 años. Antes de agotar su capacidad se procederá a la ampliación del depósito controlado a través de la construcción de la fase 3.2 que tendrá capacidad para la entrada de rechazo durante unos 9 años, siempre y cuando la entrada sea similar a la actual.

El depósito controlado dispone de un sistema de tratamiento de lixiviados que permite tratar todos los lixiviados que se generan en el depósito. También consta de dos microturbinas que contribuyen en el aprovechamiento energético del biogás.

Según los estudios geotécnicos realizados por el Grup Subsól, el depósito controlado de Orís se apoya sobre un terreno de Calcolutites de roca dura. El terreno no es excavable mediante retroexcavadoras y, por tanto, la excavación se dio mediante voladuras. En la figura 3.7, se presenta el resultante de la excavación mediante voladuras del terreno del depósito controlado de Orís.



Figura 3.7. Roca calcutita procedente de la excavación en voladura de la ampliación del depósito controlado de Orís. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 3.7, el resultante de la excavación con voladuras son grandes rocas que no son fáciles de manejar y requiere la utilización de machacas para poder aprovechar este material como terraplén. Lo cual, estamos hablando que en el vertedero de Orís, dado las circunstancias del terreno nos encontramos en una situación donde resulta ser costosa tanto la excavación como el manejo posteriori de los materiales resultantes.

También cabe considerar que, en los sondeos realizados por el estudio geotécnico, no se halló ningún nivel freático.

3.2.7 Marco legal

El marco legal en el cual nos encontramos ante la ejecución de la ampliación del depósito controlado de Orís es el *DECRET 1/1997, 7 de enero, sobre la disposición de los residuos en los depósitos controlados de la Generalitat de Catalunya* para residuos de clase II.

En relación a los criterios de impermeabilización natural y artificial del vaso; y, drenaje de los lixiviados para un depósito controlado para residuos no especiales (clase II). Los temas que caben destacar de su diseño son los siguientes puntos:

- 1) La formación geológica sobre la que repose un depósito controlado de clase II deberá tener una permeabilidad, medida en condiciones de saturación, inferior o igual a 10^{-9} m / s en espesor de al menos 2 m.
- 2) En el caso en que la formación geológica no cumpla de manera natural las condiciones antes mencionadas y siempre que no se trate de una zona constituida por importantes grosores de los siguientes materiales: a) Materiales consolidados con elevada permeabilidad por intensa fisuración. b) Materiales porosos no consolidados tales como depósitos aluviales y llanuras costeras actuales, terrazas y depósitos aluviales antiguos poco cementados. c) Capas de alteración superficial de materiales originalmente poco permeables (margas, rocas ígneas, etc.), o bien, d) De una zona inundable por crecidas de un curso de agua relativas a un periodo de retorno de 500 años.

Se tomará la medida complementaria de impermeabilización artificial siguiente: se instalará una capa de impermeabilización mineral sobre todo el vaso del depósito controlado con un espesor mínimo de 90 cm y una permeabilidad inferior o igual a 5×10^{-10} m / s. El proyecto constructivo del vertedero deberá ser acompañado por un pliego detallado de condiciones para la calidad, extracción, tratamiento, extensión, compactación y control de la capa de impermeabilización mineral.

- 3) Sobre todo el vaso del depósito controlado se instalará una lámina sintética de impermeabilización de, como mínimo, 1,5 mm de espesor. En cada caso, la Junta de Residuos fijará el grosor adecuado de la lámina. La lámina deberá ser mecánicamente resistente, biológicamente y químicamente compatible con los lixiviados de los residuos almacenados. La lámina deberá protegerse debidamente. La pendiente máxima de la lámina sintética sobre los flancos laterales del depósito controlado o sobre los muros de contención de los residuos será inferior a 2: 1 (2 horizontal y 1 vertical). En el caso de existencia de pendientes más importantes se instalarán dispositivos intermediarios de anclaje. Se realizarán controles de la calidad de la lámina sintética y de su correcta instalación.
- 4) Sobre la lámina sintética de impermeabilización se instalará un nivel drenante continuo de un espesor mínimo de 50 cm constituido por gravas con una permeabilidad superior o igual a 10^{-3} m / s. En el caso de querer utilizar otros materiales drenantes, serán sometidos a consideración de la Junta de Residuos. La pendiente mínima del sistema de drenaje hacia el punto de evacuación de los lixiviados será del 2%. El nivel drenante estará protegido en su parte superior por un geotextil filtrante o por una capa constituida por un material granular fino. En el caso de depósitos controlados que estén diseñados para recibir residuos orgánicos fermentables con un contenido en materia orgánica superior al 15% esta protección no será instalada. En el seno del nivel drenante, sobre el fondo del vaso del depósito controlado se instalará

una red de tubos de drenaje a fin de facilitar la evacuación de los lixiviados hacia un colector principal. Los tubos de drenaje serán resistentes al ataque químico y biológico de los lixiviados y capaces de soportar la carga de los residuos que se depositarán en la instalación sin sufrir ni deformaciones ni roturas.

Los tubos de drenaje tendrán un diámetro mínimo de 20 cm para permitir la evacuación de los lixiviados y su mantenimiento. Los flancos del depósito controlado deberán estar equipados con un dispositivo de drenaje adaptado a su geometría para facilitar la evacuación de los lixiviados hacia el drenaje de fondo.

- 5) La estabilidad mecánica del conjunto formado por el sistema de impermeabilización artificial, drenaje y la masa de residuos depositada deberá ser justificada mediante los cálculos correspondientes. En el caso en que los resultados de los cálculos de estabilidad no permitan la instalación de una lámina sintética de impermeabilización ésta se reemplazará por otro sistema de impermeabilización equivalente el cual será sometido a consideración de la Junta de Residuos.
- 6) Cualquier otro sistema de impermeabilización artificial y / o de drenaje del depósito controlado propuesto por la entidad explotadora del depósito controlado y susceptible de ofrecer garantías similares será sometido a consideración de la Junta de Residuos.
- 7) La estanqueidad natural pedida a la formación geológica subyacente al depósito controlado, así como las características y dimensiones del sistema de impermeabilización artificial y de drenaje, podrán ser modificadas si los progresos técnicos y científicos lo aconsejan y la Junta de Residuos lo considera conveniente.

3.3 JUSTIFICACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

En este apartado, nos centraremos en estudiar dos alternativas de sistemas de impermeabilización que fueron planteadas en un caso práctico y real de estudio del depósito controlado de Orís (Osona).

Como sistemas de impermeabilización de vertederos para el caso concreto de Orís se estudiaron dos alternativas:

- 1) **Barrera mineral natural o tradicional (BMN):** ésta era la solución inicial del proyecto y es el sistema de impermeabilización que más se ha utilizado en España. Se caracteriza por una capa de arcillas compactadas en contacto con el suelo más una lámina bentonita colocada encima y, por encima de ésta, otra lámina de material PEAD como se presenta en la figura 3.8. Esta solución es la más común como capa impermeabilizante dada que se ejecuta principalmente por materiales naturales procedentes de excavaciones o canteras y en la mayoría de los casos su coste es razonable. No obstante, en algunas situaciones como fue la ampliación de la 3 fase del depósito controlado de Orís donde fue costoso el suministro de arcillas y que éstas cumplieran con los requisitos de impermeabilidad, se plantearon otras alternativas más viables económicamente.

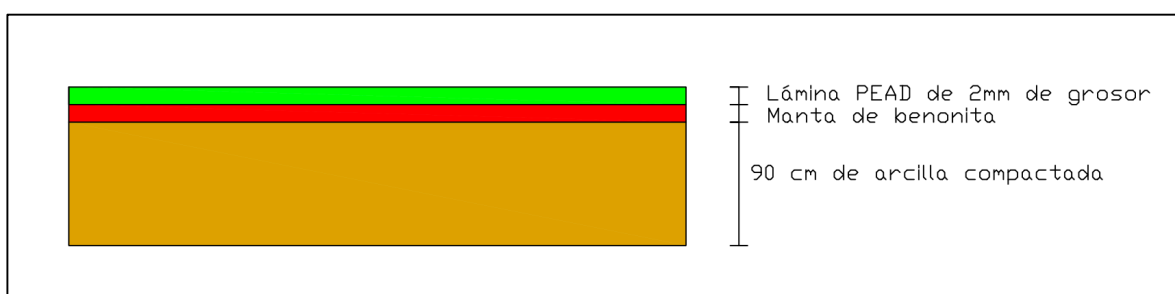


Figura 3.8. Sección de la capa impermeabilizante con barrera mineral natural. Fuente: Elaboración propia.

- 2) **Barrera mineral artificial (BMA):** este sistema se desarrolló en Holanda dado que la arcilla es un recurso muy escaso. Como alternativa se desarrolló en este país un material impermeable artificial conocido como Trisoplast (arena bentonítica modificada con polímero) que permite sustituir la arcilla y la manta de bentonita de la solución tradicional, pero es igualmente necesaria disponer de una lámina PEAD instalada encima de este material para garantizar el sellado. En la figura 3.9 se presenta la sección de esta capa sellante:



Figura 3.9 Sección de la capa impermeabilizante con barrera mineral artificial. Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes apartados se presentan las dos soluciones de forma más detallada y descriptiva.

3.4 BARRERA MINERAL NATURAL

La alternativa con barrera mineral natural era la prevista como solución de la impermeabilización de la tercera ampliación del depósito controlado de Orís y fue en efecto la solución que se realizó.

Esta solución, que también se le denomina como tradicional ya que la mayoría de los vertederos en España se construyen con esta tipología, se basa principalmente en un gran espesor de arcillas compactadas (unos 90-100cm) con unos requisitos definidos de impermeabilidad, una lámina de bentonita y una lámina de polietileno de doble capa. Por encima de esta capa sellante, se coloca 50 cm de gravas drenantes embutidos entre láminas de geotextiles de alta densidad (800 gr/m²) con tal de recoger los lixiviados mediante un tubo de PEAD ranurado y, así, poderlos finalmente procesar en la depuradora del propio depósito controlado.

En la figura 3.10 se presenta la sección del fondo de la solución prevista en proyecto de la ampliación del depósito controlado de Orís:

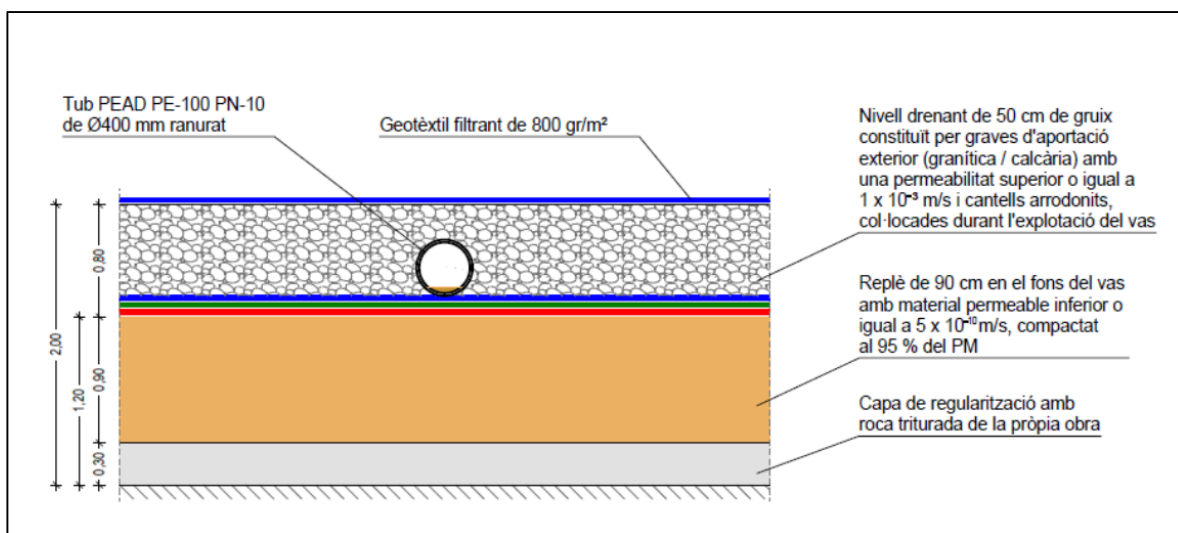


Figura 3.10 Sección tipo del sistema tradicional de impermeabilización y drenaje del vertedero de Orís.

Fuente: "Projecte per la Construcció de la tercera fase d'ampliació del VAS B" en el municipi de Orís (Barcelona).

Con tal de profundizar en el conocimiento de esta solución, en los próximos subcapítulos se procede a describir los 3 materiales impermeabilizantes que se utilizan como solución de la barrera mineral natural:

- 90 cm de arcillas compactadas.
- Mantas de bentonita (GCL).
- Geomembranas impermeables (PEAD).

3.4.1 Arcillas compactadas

La solución con arcillas compactas ha sido la solución que más se ha utilizado a lo largo de los años para la impermeabilización de los vertederos controlados gracias a su capacidad impermeabilizante; y, en la mayoría de los casos, gracias a su abundancia como material, a su fácil colocación y precio razonable (en la mayoría de los casos). En la figura 3.11, se presenta una imagen de la ejecución de las capas de arcilla en el depósito de Orís.



Figura 3.11. Capa de arcillas compactadas sobre el vaso del depósito controlado de Orís (Osona).

Fuente: Elaboración propia.

Para ello, el material requiere de unos valores de permeabilidad para la barrera geológica natural y se ve sometida a problemas de ejecución como el extendido, compactación, desecación, etc. Por lo tanto, requiere un seguimiento de control de calidad porque la permeabilidad de la arcilla dependerá de la tensión volumétrica de retracción y de la energía aplicada en la compactación y de la humedad.

El espesor a colocar de la arcilla irá en función de la permeabilidad obtenida en los ensayos geotécnicos. Para un vertedero para residuos no peligrosos (clasificación II), el espesor necesario sería de al menos 1m si la arcilla obtiene una permeabilidad de 10^{-9} m/s, que es un valor asequible si preguntamos a proveedores.

Esta solución con arcillas es efectiva para el sellado frente a gases cuando está húmeda y mientras el sistema de impermeabilización no presente fisuras. Las fisuras

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

que se puedan derivar pueden ser debidas a problemas de durabilidad como desecación y fisuración a medio plazo o a asentos diferenciales.

A nivel constructivo, las arcillas compactadas permiten solapar capas de forma continua sin problemas; y, la puesta de obra es sencilla pero lenta comparada con otros sistemas. Como preparación previa, se suele colocar una sub-base compactada que puede ser de granulometría gruesa; muchas veces, procedente de la misma obra.

3.4.2 Mantas de bentonita (GCL)

Las mantas de bentonita se colocan como complemento a la barrera geológica natural para mejorar su comportamiento impermeable debido a que su permeabilidad es del orden de 10^{-11} m/s, es decir entre 10 y 100 veces menor que las arcillas compactas. En la figura 3.12 se presenta el material de la manta de bentonita y su colocación en un depósito controlado.



Figura 3.12. A la izquierda, rollo de manta de bentonita. Fuente: Impenor Asbitra. A la derecha, colocación de la manta de bentonita. Fuente: Grupo Parra.

No obstante, las mantas bentonitas presentan problemas de durabilidad debido a que sufren procesos de retracción y figuración debido a intercambios iónicos entre cationes si en el vertedero circulan aguas carbonatadas. Estos procesos de degradación se aceleran con el paso del tiempo en esas condiciones dando lugar a un incremento del flujo de lixiviados a través de la manta de bentonita.

El pequeño espesor de las mantas de bentonita (6-10mm) hace que sean muy sensibles a agresiones de sustancias químicas presentes en los lixiviados que pueden desplazar la bentonita en puntos concretos, generando futuras filtraciones al crearse caminos preferentes a la circulación de los fluidos.

A nivel constructivo, las mantas de bentonita presentan problemas por su falta de estabilidad en los taludes; y, problemas en los solapes entre las mantas y sellado de los conductos que atraviesan la capa.

3.4.3 Geomembranas impermeables (PEAD)

Este material se suele utilizar tanto en los sistemas tradicionales de impermeabilización mediante arcilla compactada con manta de bentonita como con el nuevo sistema con barrera mineral artificial (Trisoplast). Se instalan normalmente estas geomembranas impermeables de Poli-Etileno de Alta Densidad (PEAD) de 1-2 mm de espesor, lisas o rugosas por encima de la barrera mineral.

Sin embargo, hay que considerar que las geomembranas presentan una alta vulnerabilidad frente a daños puntuales y punzonamiento; por ello, se deben proteger con geotextiles antipunzonamiento, tanto en su contacto inferior como en el superior para evitar la penetración de elementos cortantes como las gravas, las irregularidades del terreno, u otros elementos punzantes. En la figura 3.13 se puede observar los efectos producidos por cortes y punzonamientos por los motivos explicados.



Figura 3.13 Punzonamientos y cortes de una geomembrana de PEAD. Fuente: Grupo Terratest.

A nivel constructivo, hay que considerar que las geomembranas presentan una elevada sensibilidad a la calidad de la puesta en obra. Las instalaciones tienen que ser cuidadosas; siempre a cargo de personal especializado; y, con especial atención a los detalles constructivos. Por ejemplo, en el sellado de los conductos e instalaciones que atraviesen la barrera impermeable donde con frecuencia se han detectado fugas de lixiviados. Estos problemas se suelen detectar al cabo de los años cuando entonces las reparaciones son muy costosas, ya que, las fisuras son prácticamente ilocalizables.

3.5 BARRERAL MINERAL ARTIFICIAL

La barrera mineral artificial se compone principalmente por un material impermeable artificial conocido como Trisoplast (arena bentonítica modificada con polímero con un espesor de 7-9 cm) más una lámina PEAD instalada encima de este material tal y como se presenta en la figura 3.14.



Figura 3.14 Ejecución constructiva barrera mineral artificial. Fuente: Grupo Terratest.

Ésta es la solución que se propuso al Consorcio de gestión de residuos de Osona en su día como alternativa a la solución del proyecto con barrera mineral natural por parte de la contratista Certis Obres i Serveis SAU, dada la complejidad económica de encontrar arcillas que cumplieran con los requisitos de impermeabilidad del proyecto.

En origen, este sistema con barrera mineral artificial se desarrolló en Holanda hace más de 10 años. El primer vertedero holandés con esta solución fue en Wijster en el año 1995. Actualmente, es el sistema más utilizado en ese país como solución de sellado e impermeabilización de vertederos controlados; y, su uso se ha expandido a otros países como se puede ver en la figura 3.15.

Cabe considerar que el material Trisoplast no sólo es utilizado para la construcción de vertederos; sino también, es usado como solución para el sistema impermeabilizante de estructuras, balsas, estanques y contención de materiales contaminantes como el petróleo.

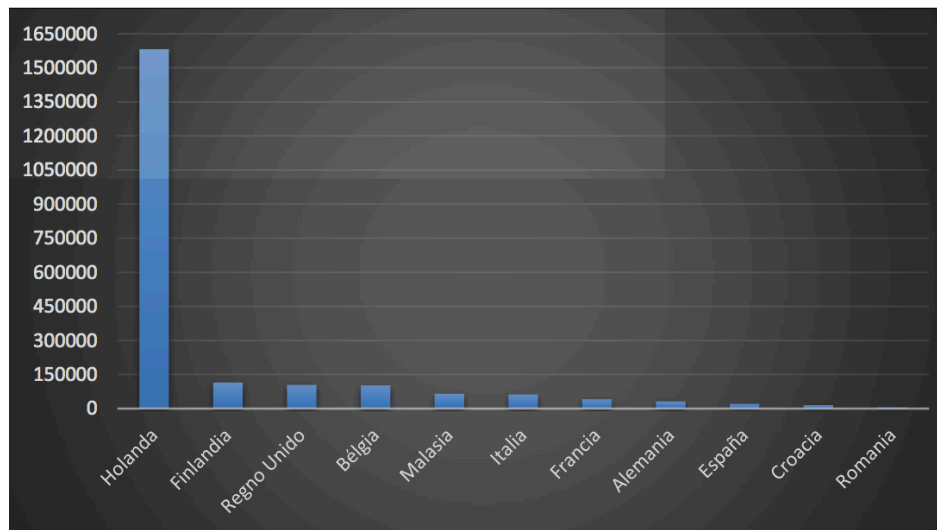


Figura 3.15 Superficie (m²) utilizada con Trisoplast según países. Fuente: Trisoplast Mineral Liner.

Como se puede observar en la figura 3,15, Holanda ha sido el país pionero en la utilización de este material como solución impermeabilizante. Uno de los motivos principales en el uso del Trisoplast en Holanda fue la escasez de la arcilla y, consecuentemente, su incompetencia de mercado. A nivel español, el vertedero que se ha utilizado, hasta día de hoy, mediante la solución con Trisoplast fue el Vaso del vertedero de Biniatria Alcudia en Mallorca debido a la inexistencia de arcilla suficiente para la realización de la obra y, como solución a problemas técnicos de sellado del vertedero.

Si hablamos respecto a la composición del material, el Trisoplast es un material dosificado a partir de la mezcla de arena con bentonita modificada por un polímero como se puede ver en la figura A1.4. Posteriormente a la mezcla, se extiende y se compacta en obra (90% del Proctor Normal) mediante procedimientos ordinarios en la obra civil; como se pueden ver en las figuras 3.16 y 3.17.

Esta solución sirve como barrera geológica artificial para sellar e impermeabilizar los vertederos como sustituto del sistema tradicional mediante arcillas compactadas y manto de bentonita, aun manteniendo como capa superior la lámina de PEAD.

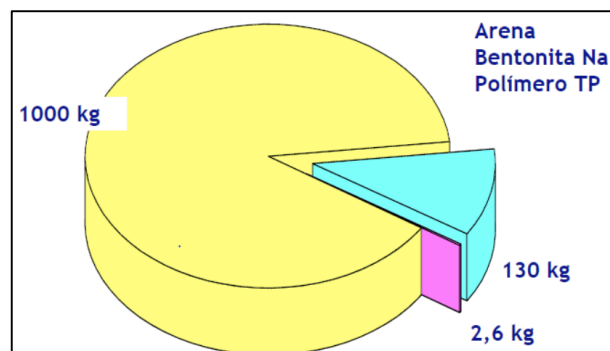


Figura 3.16 Dosificación Trisoplast. Fuente: Trisoplast Mineral Liner.



Figura 3.17 Extendido y compactación de Trisoplast. Fuente: Grupo Terratest.

La mezcla arena-bentonita-polímero (Trisoplast) adquiere - gracias a los enlaces químicos entre los 3 elementos- una menor permeabilidad que con los materiales empleados tradicionalmente. Su permeabilidad puede variar entre 0,1 a 3×10^{-11} m/s. Utilizando los espesores más usuales de Trisoplast que oscilan entre 7 y 10 cm, equivaldría a un coeficiente de permeabilidad de 3 m de arcilla con permeabilidad $(k) < 10^{-9}$ m/s. En la tabla A1.2, se presentan las permeabilidades de los distintos materiales de impermeabilización en vertederos:

| Material | Arcilla compacta | Manta bentonita | Trisoplast |
|---------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Permeabilidad | Del orden de 10^{-9} m/s | Del orden de 10^{-11} m/s | Del orden de 10^{-11} m/s |

Tabla 3.2. Comparativo de permeabilidades entre materiales.

Entre otras ventajas, el Trisoplast proporciona respecto al sistema tradicional una mejor resistencia mecánica, gracias a la aportación de la arena, y a una mayor flexibilidad e impermeabilidad gracias al gel bentónico polimérico. El Trisoplast no es una barrera sensible a los daños puntuales y es un material estable frente al ataque de sustancias químicas; y, es totalmente impermeable a la fuga de los gases producidos del vertedero. La estabilidad e impermeabilidad en taludes es mejor respecto a la arcilla por su elevado ángulo de rozamiento interno (similar a las arenas) y permite trabajar con taludes hasta de 2H:1V con maquinaria adecuada. Es un sistema más conveniente ante los asentamientos diferenciales gracias a su plasticidad y elasticidad.

A nivel constructivo, la fabricación del Trisoplast se ejecuta “in situ” a pie de obra mediante una planta móvil; y posteriormente a la fabricación, se extiende mediante retroexcavadora o con pavimentadora, tal como puede verse en las *figuras 3.18a y b*.



Figura 3.18. Trisoplast: a) Planta de fabricación "in situ" y b) Puesto en obra. Fuente: Grupo Terratest.

Finalmente, se compacta con equipos ligeros hasta conseguir la densidad de Proctor especificada (90%). Su puesta en obra es muy rápida comparada con la arcilla compactada. Los rendimientos medios de puesta de obra con este sistema oscilan entre 1000 y 3000 m²/día dependiendo de la tipología de la obra. Cabe considerar que es necesario la instalación inmediata de la lámina de PEAD, con tal de evitar riesgos de desecación y facilitar el confinamiento de la capa mineral; así como, será necesario un control estricto de calidad de todas las termo-soldaduras y soldaduras por extrusión de las geomembranas PEAD mediante ensayos específicos.

3.6 CONCLUSIONES

En relación a las condiciones de contorno del depósito controlado del municipio de Orís, en la comarca de Osona, en la provincia de Barcelona, se destaca su ubicación próxima a la red vial C-17 que es sin duda una infraestructura que trabaja como una espina dorsal de la economía de la comarca. Los sectores predominantes de la comarca son la industria agroalimentaria, el sector metal-mecánico y el sector de logística y transporte de mercancías. Dado que, la conexión ferroviaria de mercancías es inexistente, la única vía de transporte es la red viaria. Es por ello que será importante ponderar positivamente aquella alternativa que repercuta con el menor impacto al tráfico sobre esta vía de circulación.

Desde el punto de vista social de la comarca, se ha observado que la situación de los datos de la tasa de paro de Osona son más positivos que la media catalana, pero si lo comparamos con otros países de la Unión Europea como Alemania, Dinamarca o Países Bajos se sitúan con valores de desempleo del orden de la mitad. Por ello, considero importante, de cara a la toma de decisión por parte de la Administración, considerar la generación de empleo de cada alternativa en el caso que sea discriminante.

Desde un punto de vista técnico en relación a los terrenos de ubicación del depósito controlado de Orís, comentar que según los estudios geotécnicos realizados por el Grup Subsól, el depósito controlado de Orís se apoya sobre un terreno de Calcolutites de roca dura. El terreno no es excavable mediante retroexcavadoras y, por tanto, la excavación se realiza mediante voladuras. De este modo, el resultante de la excavación con voladuras son grandes rocas que no son fáciles de manejar y requieren la utilización de machacas para poder aprovechar este material como terraplén; por lo que, estamos hablando que en el depósito controlado de Orís dadas las circunstancias del terreno nos encontramos en una situación donde resulta ser costosa tanto la excavación como el manejo posteriori de los materiales resultantes. Consecuentemente, aquellas alternativas que permitan reducir la cantidad de excavación como consecuencia de su menor grosor, permitirán reducir considerablemente los costes de construcción.

También cabe considerar que, en los sondeos realizados por el estudio geotécnico, no se halló ningún nivel freático; por lo tanto, podemos corroborar que la ubicación del depósito controlado es correcta medioambientalmente dado que se evita la interacción con aguas subterráneas.

En relación al marco legal en el cual nos encontramos ante la ejecución de la ampliación del depósito controlado de Orís como hemos visto es el DECRET 1/1997, 7 de enero, sobre la disposición de los residuos en los depósitos controlados de la Generalitat de Catalunya para residuos de clase II. En este marco, se recomienda unos criterios de construcción del sistema de impermeabilización; pero, legalmente se permite el dimensionamiento de cualquier otro sistema de impermeabilización artificial propuesto por la entidad explotadora del depósito controlado si ofrece garantías funcionales similares al sistema de referencia según decreto.

En relación al dimensionamiento del sistema de impermeabilización y sellado del depósito controlado de Orís, se han considerado dos alternativas: una, la barrera mineral natural y, otra, la barrera mineral artificial. La barrera mineral natural o también conocida como tradicional es aquella que se ha utilizado en la mayoría de los depósitos controlados de España. Se compone por tres capas de materiales: una primera capa, arcillas compactadas en la capa en contacto con el terreno o con la superficie de apoyo; una segunda capa, manta de bentonita (GCL) en el medio y una tercera y superior capa, geomembrana impermeable de PEAD en contacto con las capas drenantes del depósito. Esta solución es interesante en la mayoría de los casos dada la disponibilidad del suministro de la arcilla.

No obstante, en el caso del depósito controlado de Orís, la disponibilidad de las arcillas que cumplieran con los requisitos de permeabilidad resultaban ser costosas por la lejanía de los proveedores. Razón por la cual se estudió la viabilidad de otra solución como es la impermeabilización de la base con la barrera mineral artificial que utiliza un material denominado comercialmente como Trisoplast. Este material se desarrolló en Holanda por la falta de disponibilidad de arcillas en este país. El

Trisoplast está compuesto de una arena bentonítica modificada con polímero que permite substituir tanto la capa de las arcillas compactadas como la manta de bentonita de la barrera mineral natural; aunque se hace igualmente necesaria la colocación encima de la geomembrana de PEAD.

Finalmente, se presenta la tabla 3.3. que recoge todos los aspectos técnicos entre los dos sistemas de sellado e impermeabilización descritos a lo largo del capítulo; y, en la figura 3.19 se presenta un croquis constructivo de las secciones de las dos alternativas de sellado para el depósito controlado de Orís.

| ESTUDIO TÉCNICO ENTRE LOS SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN EN LOS DEPÓSITOS CONTROLADOS | | | |
|---|---|---|---|
| SISTEMAS | BARRERA MINERAL | | |
| | NATURAL | | ARTIFICIAL |
| MATERIALES | ARCILLA COMPACTADA | MANTA DE BENTONITA | TRISOPLAST |
| Permeabilidad (m/s) | 5×10^{-10} | 2×10^{-11} | 3×10^{-11} |
| Flujo hidráulico (mm/año) | <ul style="list-style-type: none"> 23,3 en caso de arcilla más manta de bentonita. (3 veces superior con Trisoplast) 24,5 en caso solo arcilla compactada. (3,1 veces superior que con el Trisoplast) | | 7,70 |
| Sellado frente a gases | Solo efectivo en estado húmedo. | | Siempre efectivo, pues mantiene. |
| Durabilidad | Problemas de desecación y fisuración a medio plazo. | Problemas de intercambio iónico en aguas carbonatadas y dificultad en taludes | Comprobado a largo plazo mediante estudios. |
| Agresiones puntuales | Muy resistente | Problemas de eliminaciones puntuales | Muy resistente |
| Asientos diferenciales | Poco tolerante y pueden producirse fisuras irreversibles. | Muy tolerante | Muy tolerante por su comportamiento plástico. |
| Autoreparación | Inexistente, carece de hinchabilidad. | Es buena mientras no sufra agresiones químicas. | Muy buena. |
| Ejecución de solapes | Fácil por ser una capa continua | Complicados, requieren un control de calidad exhaustivo. | Fácil por ser una capa continua. |
| Ejecución de taludes | Difícil. | Fácil, pero con riesgo de solifluxión. | Hasta 2H:1V |
| Puesta en obra | Ejecución lenta. Requiere equipos sencillos. Sensible a humedad y compact.. | Ejecución rápida. Requiere equipos sencillos. | Ejecución rápida. Requiere equipo sencillo. |

Tabla 3.3. Estudio técnico y económico entre los sistemas de impermeabilización de vertederos. Fuente: Elaboración propia.

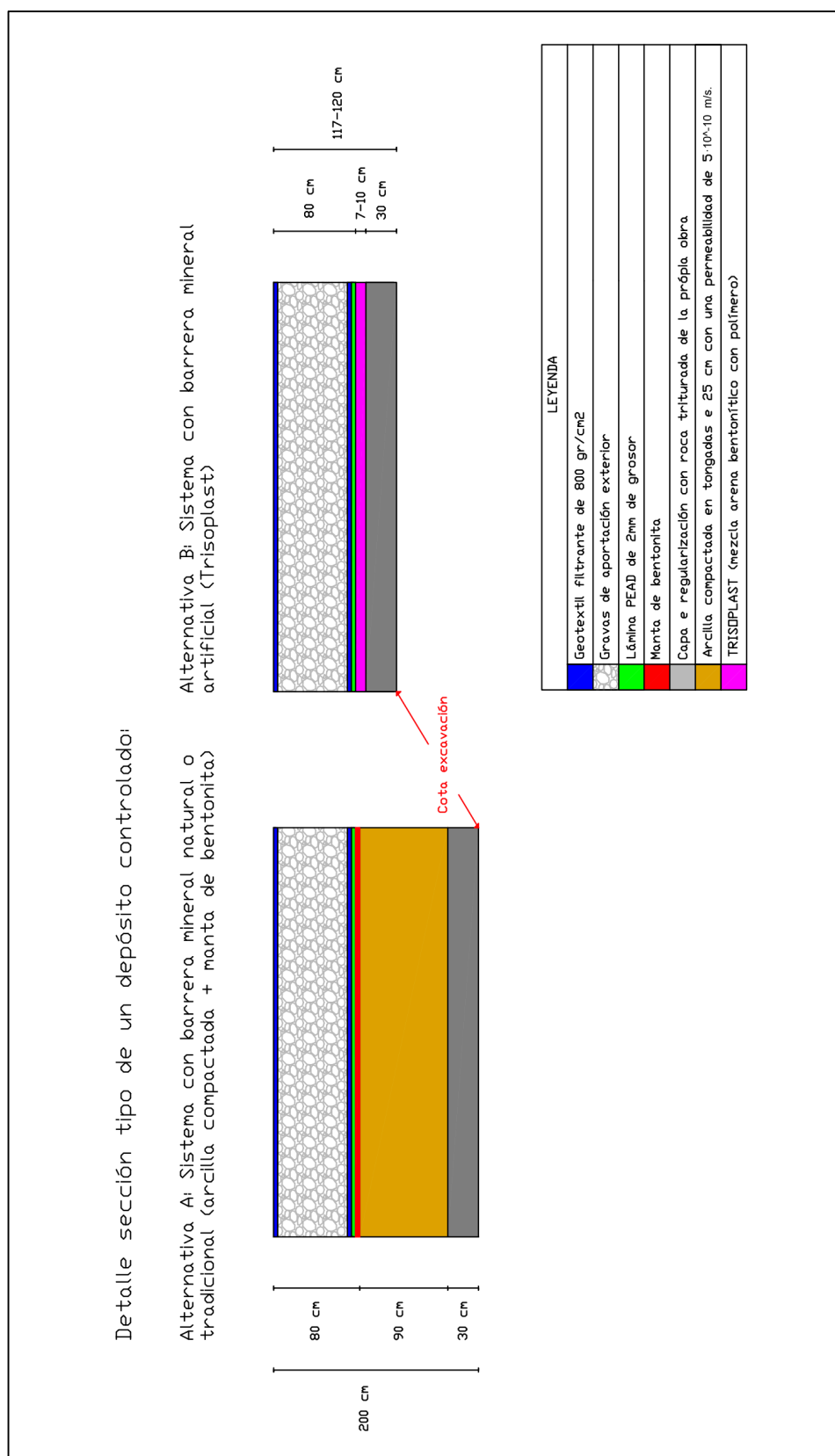


Figura 3.19. Secciones tipo de las dos alternativas de sellado para el depósito controlado de Orís (Barcelona). Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DE SOSTENIBILIDAD

4.1 INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha presentado en el capítulo 1, uno de los objetivos principales de esta tesina es aprender a desarrollar una metodología para la toma de decisión de distintas alternativas mediante una evaluación de sostenibilidad. He creído interesante estudiar un caso concreto de evaluación de sostenibilidad en el que se comparan dos alternativas de sistemas de impermeabilización en el depósito controlado de Orís: una es la barrera mineral natural (BMN) y otra es la barrera mineral artificial (BMA).

Con tal de poder realizar una exhaustiva evaluación de sostenibilidad sobre el tema y de extraer aquellos aspectos fundamentales a tener en consideración, en el capítulo 2 se ha profundizado sobre el conocimiento de los depósitos controlados: impactos principales y los sistemas básicos de diseño. Seguidamente en el capítulo 3 y de forma más concreta, se han estudiado las condiciones de contorno del depósito controlado de Orís; y, se han justificado y desarrollado las dos alternativas que se han querido comparar en la evaluación de sostenibilidad.

De esta forma, habiendo desarrollado los conocimientos sobre los depósitos controlados; estudiado las condiciones de contorno y las alternativas en los capítulos anteriores; se procede en este capítulo a realizar la evaluación de sostenibilidad con tal de tomar una decisión entre las dos alternativas.

Para la toma de decisión, se considera que la mejor alternativa; es decir, la más sostenible es la que resulte ser la que consiga mayor puntuación del índice de sostenibilidad; atendiendo a tres aspectos básicos según el principio de sostenibilidad de la “Declaración de Río de Janeiro Sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo” 1992: el económico, el social y el medio-ambiental.

En los próximos apartados, se describe, en primer lugar, la metodología usada para la evaluación de sostenibilidad mediante el programa MIVES; y, en segundo lugar, se va describiendo de forma ordenada la metodología para el caso concreto del estudio.

Finalmente, en este capítulo, se obtienen los resultados de la evaluación de sostenibilidad; y se realiza un análisis de sensibilidad para verificar y entender mejor los resultados obtenidos.

4.2 METODOLOGÍA

4.2.1 Introducción

La herramienta que se ha utilizado para el desarrollo y evaluación de la sostenibilidad ha sido la metodología MIVES (Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles) que permite sintetizar y objetivar la toma de decisión. Esta metodología consiste en una herramienta informática libre desarrollada conjuntamente por la Universidad del País Vasco, Labein-Tecnalia y la Universidad Politécnica de Cataluña (parte probabilista en la Universidad de Coruña).

Esta metodología (MIVES) se ha utilizado previamente para casos donde se necesitaba una justificación objetiva de la decisión tomada como: licitación de proyectos, sistemas de contratación de obras, proyectos de edificación/infraestructuras, adquisición de productos de todo tipo, evaluaciones universitarias, etc.

La idea principal de esta herramienta es poder obtener un resultado final (entre 0 y 1) a partir de la evaluación o cuantificación de distintos indicadores o valores cuantificables que se obtienen de cada alternativa. Por lo tanto, esta herramienta permite dar una resolución fácil de entender ante una toma de decisión multi-criterio que puede ser compleja.

El modelo informático desarrollado por investigadores de la UPC, liderados por el Profesor Alejandro Josa, está compuesto por 3 partes: el MIVES Programador, el MIVES usuario y el MIVES report. Dicho programa está accesible, si bien se requiere registrarse. Previamente al modelaje se tiene que definir exhaustivamente la unidad

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

funcional que se quiere comparar entre las alternativas, así como determinar los límites del sistema y las hipótesis consideradas.

El modelo se inicia con el MIVES programador donde se define el árbol jerárquico (requerimientos, criterios e indicadores) y se asignan unos pesos relativos a todas las ramas del árbol. Para una buena evaluación, el árbol debe tener un mínimo de indicadores, pero tampoco un exceso de éstos, puesto que puede dificultar la evaluación. Estos indicadores deben ser independientes entre ellos; así como relevantes y discriminantes entre las distintas alternativas. Además, se tiene que determinar las funciones de valor que se asignan a cada indicador. La función de valor nos permite transformar las unidades específicas de un indicador a una unidad común normalmente entre 0 y 1.

En el MIVES usuario es donde se introducen la cuantificación de los indicadores y, finalmente, en el MIVES Report es donde se obtiene los resultados mediante tablas y gráficos representativos.

En los próximos apartados se detallarán más ampliamente la unidad funcional, los límites del sistema y las hipótesis consideradas.

4.2.2 Unidad funcional

Es importante, en una evaluación de sostenibilidad, definir de forma exhaustiva y concreta la unidad funcional con la que se comparará las distintas alternativas. De no definirse de este modo, los resultados carecerían de rigor y fiabilidad puesto que las alternativas deben compararse en unas mismas condiciones de contorno.

La unidad funcional descrita para la evaluación de sostenibilidad es un m² de capa en plataforma de impermeabilización de un depósito controlado de residuos no peligrosos (clase 2) localizado en el Vas B de Orís con las siguientes consideraciones:

- Con una durabilidad mínima igual a su tiempo de clausura.
- Para una zona climática mediterránea interior de Cataluña con una temperatura media de 15.0 ° C y precipitación anual de 600 mm.
- Cumpla el “Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero” respecto a los vertederos de residuos no peligrosos.
- Cumpla el *DECRET 1/1997 de la Generalitat de Catalunya* para residuos de clase de II.
- Se considera que la superficie de terreno donde se apoya la capa de impermeabilización es suficientemente resistente sin generar asientos diferenciales que repercuten a su funcionalidad.

4.2.3 Alcance y límites del sistema

El alcance que se ha considerado para la evaluación de los sistemas de impermeabilización ha sido desde la extracción de las materias primas, transporte de los materiales a obra e instalación y colocación (Ver esquema de la figura 4.1). No se ha considerado la etapa de deposición final puesto que la capa impermeabilizante ya se localiza en un vertedero (destinación final de producto).

Para realizar una comparación adecuada entre los dos sistemas de impermeabilización del depósito controlado en el municipio de Orís, se requiere limitar el ámbito de estudio y definir las hipótesis de las alternativas planteadas:



Figura 4.1. Alcance de la evaluación de sostenibilidad. Fuente: Elaboración propia.

a) Hipótesis para el sistema de impermeabilización con barrera mineral natural (BMN):

- Se considera que el proveedor de arcilla está ubicado a 100 km de Orís.
- Se considera la arcilla con una densidad de 1.900 kg/m^3 y una impermeabilidad de $5 \times 10^{-10} \text{ m/s}$.
- La empresa proveedora de la superficie de bentonita se considera ubicada a 80 km de distancia de la obra.
- Se considera la manta de bentonita como dos capas de geotextiles de polipropileno más 5 kg/m^2 de bentonita de sodio natural.

b) Hipótesis para el sistema de impermeabilización con barrera mineral artificial (BMA):

- Se considera la empresa *Terratest Group* como proveedor de Trisoplast, material compuesto de arena, polímero y bentonita. Este proveedor tiene patentada la composición y fabricación del polímero que es transportado desde Alemania a Orís, 1.500km de distancia aproximadamente.
- Se considera el proveedor de arena ubicado a 100 km de la obra en Orís.
- Se considera una empresa proveedora de la bentonita ubicada a 100 km de Orís.

4.2.4 Desarrollo del árbol de valores

En este apartado, se presenta el desarrollo del modelo de discriminación entre los sistemas de impermeabilización de vertederos mediante los tres requerimientos del desarrollo sostenible (económico, social y medioambiental). Esta estructura está basada en un modelo de jerarquización mediante un árbol de valores que está formado por tres niveles jerárquicos distintos denominados: requerimientos, criterios e indicadores.

Los requerimientos forman el primer nivel del árbol de valores. Éstos tienen un carácter general y permiten estructurar el árbol desde distintos enfoques según lo que interese al decisor. Para este estudio, los requerimientos han sido elegidos con el fin de obtener un análisis de sostenibilidad. Los tres ejes del desarrollo sostenible definidos en la Agenda 21 (Río de Janeiro, 1992) son el económico, el social y el medioambiental, tal como se muestra en la figura 4.2.



Figura 4.2 Requerimientos que definen el desarrollo sostenible. Fuente: Fuente: Emprendices.

Cada uno de estos tres ejes se puede desarrollar a su vez en un segundo nivel del árbol de valores: los criterios. Éstos no son medibles y únicamente tienen la función de agrupar los aspectos que sí serán medibles, los indicadores. Cada uno de los criterios está agrupado según las características del requerimiento al cual

pertenecen.

Finalmente, los indicadores forman parte del tercer y último nivel de un árbol de valores y se utilizan como base de medición. A diferencia de los requerimientos y de los criterios que son más bien cualitativos, los indicadores son medibles y se pueden cuantificar con tal de obtener un resultado final con el que se compararán las alternativas. En el supuesto que un indicador sea cualitativo se deberá convertir en cuantitativo para así poder medirlo y compararlo.

La evaluación de cada uno de los indicadores se realiza según una función de valor propuesta para cada uno. Esta sirve para modificar las unidades de cada uno de los indicadores y transformarlas a una misma escala, es decir, normalizar las distintas variables y cuantificarlas entre un valor de 0 a 1.

Un aspecto sumamente importante a tener en cuenta dada su repercusión en el resultado final es la elección de los indicadores. Para la elección de éstos prima que sean coherentes, que discriminen bien entre alternativas y que sean los justos y necesarios; aportando la información suficiente. Un exceso de indicadores complicaría la interpretación del resultado final y diluiría el resultado de los indicadores que son realmente importantes.

En la figura 4.2 se puede observar la estructura descrita anteriormente. A cada requerimiento se le asignan unos criterios y a su vez a cada criterio se le asignan unos indicadores.

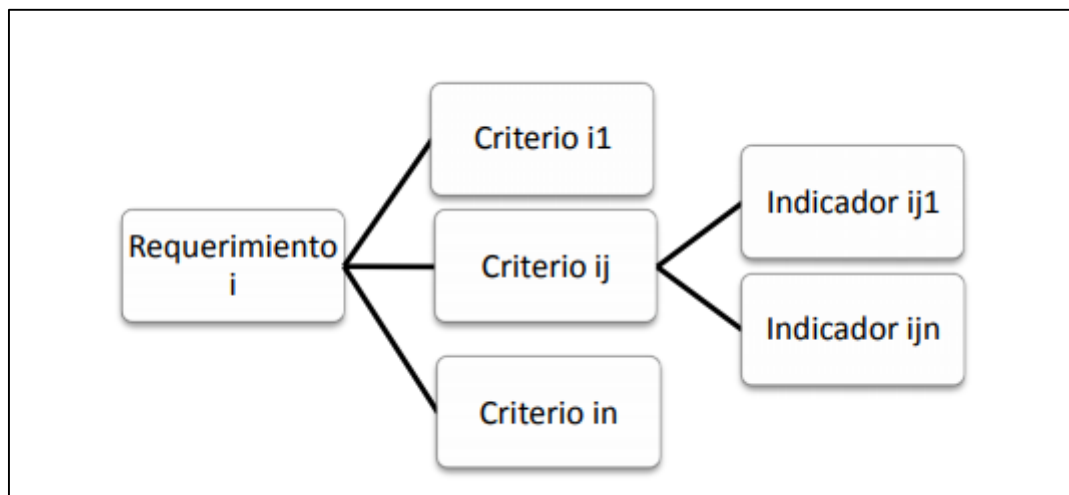


Figura 4.3 Esquema requerimientos, criterios e indicadores. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la *tabla 4.1*, se presenta el árbol utilizado para el problema de toma de decisión. El árbol se divide en los 3 requerimientos básicos de la sostenibilidad (económico, social y medioambiental) y se presentan a la derecha los indicadores (último nivel jerárquico del árbol). Debido a su complejidad e importancia

ante los resultados del problema, éstos serán descritos detenidamente en los siguientes apartados.

El número de indicadores finales es de 8, que se considera suficientemente representativo para poder discriminar entre las alternativas, centrándonos en los que son principales y discriminantes en cada grupo. Se han descartado, todos aquellos que no sean discriminante.

| Requerimientos (R) | Criterios (C) | Indicadores (I) |
|---------------------------------|---|--|
| R ₁ Económicos | C ₁ Costes de construcción | I ₁ Inversión inicial |
| | | I ₂ Disponibilidad del material |
| | C ₂ Costes a medio y largo plazo | I ₃ Costes de reparación |
| R ₂ Sociales | C ₃ Necesidad de la administración | I ₄ Tiempo de construcción |
| | | I ₅ Conocimiento |
| | C ₄ Impacto social | I ₆ Impacto al tráfico |
| R ₃ Medioambientales | C ₅ Impacto ambiental | I ₇ Análisis de ciclo de vida |
| | | I ₈ Capacidad de impermeabilización |

Tabla 4.1 Árbol de requerimientos.

4.2.5 Asignación de pesos

Como se ha comentado anteriormente, para la toma de decisión procedemos a comparar cada una de las alternativas cuantificando diferentes parámetros para así obtener una evaluación comparativa entre las alternativas.

En la toma de la decisión, un indicador, criterio o requerimiento no tiene por qué tener la misma importancia que otro de su mismo nivel. Ello dependerá del criterio del analista que dé preferencia a uno u otros aspectos. Para cuantificar las preferencias del decisor se utiliza la asignación de pesos en cada nivel de jerarquía del árbol de valores. La ponderación de los distintos niveles se realiza mediante el método de asignación directa.

Las ponderaciones de los requerimientos se han tenido en cuenta desde el punto de vista de la sostenibilidad considerando un equilibrio equitativo entre los requerimientos económicos, sociales y medioambientales con lo que $(\lambda(R_i) = 0,33; i = 1, 2, 3)$.

En la *tabla 4.2*, se muestra el árbol de valores con las correspondientes ponderaciones elegidas.

Dentro del requerimiento económico (R_1) se ha tenido en cuenta los costes de construcción (C_1) y los costes a medio y largo plazo (C_2). No se ha considerado costes de demolición porque en el caso de los vertederos es poco probable que se proceda a una demolición. En el caso que se produzcan fisuras graves se tendría que efectuar obras de reparación que podrían llegar a ser muy costosas, pero pocas veces se procede a ello. Por eso el criterio que se le ha dado más peso ha sido los costes de construcción (C_1). Dentro del criterio costes de construcción C_1 incluye los indicadores de inversión inicial (I_1) y disponibilidad del material (I_2). La disponibilidad del material repercutiría a los costes de la inversión, pero se ha creído interesante cuantificarlo por separado para ampliar mejor la visión de la evaluación económica de la fase constructiva.

| Requerimientos (R) | Criterios (C) | Indicadores (I) |
|---------------------------------------|---|--|
| R ₁ Económicos (33%) | C ₁ Costes de construcción (95%) | I ₁ Inversión inicial (90%) |
| | | I ₂ Disponibilidad del material (10%) |
| | C ₂ Costes a medio y largo plazo (5%) | I ₃ Costes de reparación (100%) |
| R ₂ Sociales (33%) | C ₃ Necesidad de la administración (80%) | I ₄ Tiempo de construcción (20%) |
| | | I ₅ Conocimiento técnico (80%) |
| | C ₄ Impacto social (20%) | I ₆ Impacto al tráfico (100%) |
| R ₃ Medioambientales (33%) | C ₅ Impacto ambiental (100%) | I ₇ Análisis de ciclo de vida (20%) |
| | | I ₈ Capacidad de impermeabilización (80%) |

Tabla 4.2 Árbol de requerimientos y asignación de pesos de cada rama.

Se ha creído que, respecto al total de los costes de construcción, la disponibilidad del material (I_2) supone un 10% y la inversión inicial (I_1) un 90%.

Dentro del requerimiento social (R_2), se ha considerado dos criterios: la necesidad de la administración (C_3) e Impacto social (C_4). El criterio de necesidad de la administración (C_3), fue de hecho en el caso concreto del estudio del vertedero de Orís, determinante en su elección de la capa impermeabilizante; por eso se le ha dado el peso del 80% del requerimiento social (R_2). Dentro de este criterio (C_3) incluye los indicadores de Tiempo de construcción (I_4) y Conocimiento técnico (I_5). Aunque el tiempo de construcción en algún caso podría ser importante, sobre todo ante una rehabilitación o reparación; el indicador más importante de cara a la administración es el conocimiento técnico que se tenga de esa alternativa.

Finalmente, dentro del requerimiento ambiental, solo se ha considerado un criterio: Impacto ambiental (C_5). Este criterio incluye a los indicadores de Análisis de

ciclo de vida (I_7) y el de capacidad de impermeabilización (I_8). El indicador de capacidad de impermeabilización evalúa el caudal de lixiviados que se filtra en el suelo en cada una de las alternativas. Dado que estamos ante el dimensionamiento de una capa impermeabilizante, este indicador (I_7) tiene que ser el más importante desde el punto de vista ambiental (80%). La cuantificación del indicador de análisis de ciclo de vida se obtiene a partir del valor único obtenido del SIMAPRO para las dos alternativas que se explica más detalladamente en el Anejo 2. En el apartado 4.3 se explica más detallada y exhaustivamente los criterios e indicadores presentados del modelo.

4.2.6 Función de valor

En este apartado, se definen la tipología de las funciones de valor que se han asignado a cada indicador y su justificación. La función de valor nos permite transformar las unidades específicas de un indicador a una unidad común entre 0 y 1. Estas funciones de valor dependen de 5 parámetros (Alarcón et al. 2011) que determinan su forma: convexa (DCX), cóncava (DCV) o lineal (DL).

En nuestro caso, 4 de los 8 indicadores presentan una función de valor decreciente convexa. Esto significa que cuanto mayor sea la cuantificación del indicador, su índice de sostenibilidad se reduce considerablemente, con lo que los valores de máxima satisfacción se encuentran en los valores mínimos. Por ejemplo, en el caso de la inversión inicial, a la administración le interesa premiar la mínima inversión posible dentro de lo razonable y real, y por tanto con esta función de valor se obtendría mayor índice de sostenibilidad para aquellas soluciones más económicas.

Se ha considerado lineales aquellos indicadores que son cualitativos y que por tanto se han tenido que cuantificar entre rangos de satisfacción. Por ejemplo, en el caso de la disponibilidad del material (I_2) se ha considerado 5 rangos de satisfacción: Muy elevada, bastante elevada, media, baja o nula. En la tabla 4.3, se presenta el esquema de las formas consideradas de la función de valor para cada indicador:

| Indicador | Forma de la función de valor |
|--|------------------------------|
| I_1 Inversión inicial | Decreciente convexa. |
| I_2 Disponibilidad del material | Lineal creciente. |
| I_3 Costes de mantenimiento y reparación | Lineal decreciente. |
| I_4 Tiempo de construcción | Decreciente convexa. |
| I_5 Conocimiento técnico | Lineal creciente. |
| I_6 Impacto al tráfico | Decreciente convexa. |
| I_7 Contaminación del suelo | Decreciente convexa. |
| I_8 Análisis de ciclo de vida | Creciente convexa. |

Tabla 4.3 Funciones de valor de los indicadores

4.3 EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES

El objetivo de este apartado es definir exhaustivamente y cuantificar los indicadores elegidos de la evaluación de sostenibilidad sobre las alternativas de capas de impermeabilización del vertedero de Orís (Osona). Para ello, los indicadores se clasifican mediante un procedimiento de evaluación a través de cuatro apartados de forma metódica que se describen a continuación:

- I. **Objetivo:** con el fin de determinar la finalidad del indicador.
- II. **Estrategia:** se argumenta la necesidad evaluativa del indicador en base al contexto del estudio.
- III. **Forma de medición:** se definen las variables que se utilizan para cuantificar el indicador.
- IV. **Función de valor:** en el último proceso, se presenta la función de valor propuesta para el indicador con su expresión y el motivo de su elección. Todas las funciones se basan en las ecuaciones del modelo de MIVES.

El presente apartado se divide en tres subapartados correspondientes a los tres requerimientos básicos de la sostenibilidad según la Declaración de Río de Janeiro (1992):

- 1) Requerimiento económico.
- 2) Requerimiento social.
- 3) Requerimiento medioambiental.

Los tres requerimientos se presentan con una estructura similar. Inicialmente, se contextualizará cada requerimiento mediante su rama del árbol, se definen los criterios de cada requerimiento; y, finalmente, se describen los indicadores, se evalúan y cuantifican.

4.3.1 Requerimiento económico (R1)

Este requerimiento pretende analizar las alternativas desde un punto de vista únicamente económico sin tener en cuenta ninguna otra consecuencia. Es decir, describe los impactos económicos de las dos alternativas a estudiar. En la tabla 4.4, se presenta la tabla de la rama del requerimiento económico:

| Requerimientos (R) | Criterios (C) | Indicadores (I) |
|---------------------------|---|--|
| R ₁ Económicos | C ₁ Costes de construcción | I ₁ Inversión inicial |
| | | I ₂ Disponibilidad del material |
| | C ₂ Costes a medio y largo plazo | I ₃ Costes de reparación |

Tabla 4.4 Rama del requerimiento económico.

4.3.1.1 Costes de construcción (C_1)

Este criterio pretende agrupar aquellos indicadores relacionados con los costos derivados de la construcción de una capa de impermeabilización de un depósito controlado en su fase inicial. Incluye los indicadores de *Inversión inicial (I_1)* y *Disponibilidad del material (I_2)*.

4.3.1.1.1 Inversión inicial (I_1)

Objetivo

El indicador de Inversión inicial pretende comparar entre las alternativas qué recursos económicos se necesitarían en el instante cero para poder implantar la capa sellante.

Estrategia

Se ha creído importante considerar este indicador porque es muy discriminante y muy relevante entre las alternativas. En la mayoría de los casos, la situación económica de la Administración requiere que las inversiones sean las menores posibles cumpliendo con las exigencias y responsabilidades marcadas por ley y sociedad.

Forma de medición

Para medir este indicador, se ha obtenido información del estudio de planificación de las obras de ampliación de los depósitos controlados de Orís y Bufalvent (Manresa). En la tabla 4.5, se presenta la cuantificación de este indicador con valores aproximados de los costes asociados a cada alternativa por m^2 (por unidad funcional). Se ha tenido en cuenta que los precios de los materiales varían mucho en función de la disponibilidad y su aproximación respecto a la obra. Ejemplos de ello, el depósito controlado de Bufalvent (Manresa) donde la obra está muy cerca de canteras de proveedores de arcilla con lo que los costes de suministro de los materiales serían menores. En cambio, en el depósito controlado de Orís, el coste del transporte es muy significativo. Se podría llegar al extremo como es el caso de Menorca donde no hay arcilla en la isla por lo que la arcilla tendría que ser llevada por transporte marítimo; y esto aún podría resultar mucho más caro.

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es convexa decreciente porque a medida que aumenta la inversión inicial, menos sostenible va a ser esa alternativa para la Administración. En este caso, se utiliza la función que se muestra en la figura 4.4, con el punto de mínima satisfacción situado en el (35,0) y el de máxima satisfacción en (18,0).

| COMPARACIÓN ECONÓMICA | | | |
|---|--|--------------------|---|
| SISTEMAS | BARRERA MINERAL NATURAL | | BARRERA MINERAL ARTIFICIAL |
| MATERIALES | ARCILLA COMPACTADA | MANTA DE BENTONITA | TRISOPLAST |
| Costes de suministro y colocación | Aproximadamente entre 12-16 €/m ² solo con arcillas compactadas, considerando el manto de bentonita unos 15-19 €/m ² . | | Aproximadamente unos 14 €/m ² para obras de 10.000 m ² . |
| Sobrecostes por incremento de movimiento de tierras | Con el mismo nivel de cota de vertedero, cabe considerar 80 cm de espesor de sobrecostes de movimiento de tierras aproximadamente de 7€/m ² en Orís. | | |
| Costes totales | Sin considerar el manto de bentonita, los costes totales serían 19-23 €/m ² . Considerando el manto de bentonita, los costes totales aproximadamente serían unos 22-27 €/m ² | | Aproximadamente unos 14 €/m ² para obras de unos 10.000 m ² . |

Tabla 4.5. Comparativo económico de las capas impermeabilizantes.

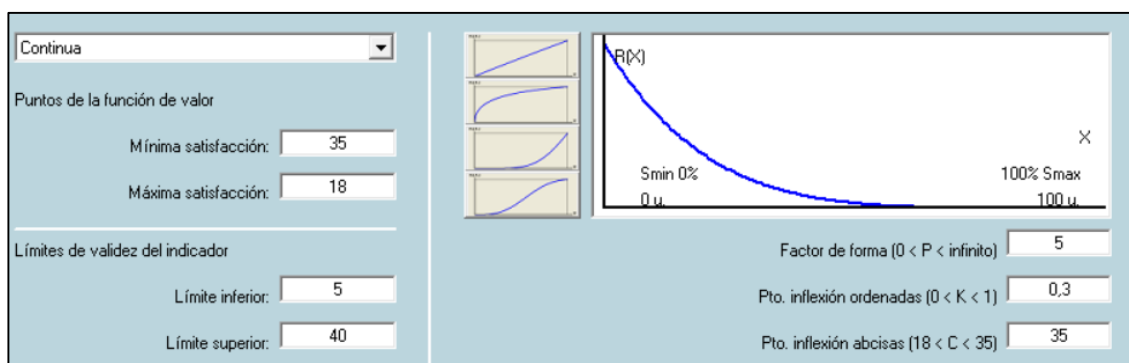


Figura 4.4 Función de valor del indicador Inversión inicial. Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.1.2 Disponibilidad del material (I_2)

Objetivo

El indicador de disponibilidad del material pretende comparar entre las alternativas qué cantidad de proveedores y competencia hay en el mercado. Cuantos más proveedores tenga una alternativa o solución menor riesgo se asume a la hora de su contratación de que pueda haber algún fallo o inconveniente.

Estrategia

Es necesario tener en cuenta este indicador porque realmente es muy discriminante a la hora de comparar una alternativa con la otra. El sistema tradicional

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

de arcilla compactada tiene la ventaja que se puede encontrar en varias canteras en Cataluña; en cambio, la solución con una barrera artificial como el Trisoplast solo está patentada por la empresa Grupo Terratest en España. No obstante, encontrar una cantera de arcilla que cumpla con los requisitos de proyecto no es siempre tan fácil.

Forma de medición

Este indicador se evalúa en función de su grado de disponibilidad en el mercado. En función de su grado de disponibilidad se le asigna mayor puntuación. Por un lado, en la zona del interior de Cataluña hay bastante disponibilidad de arcilla, pero no es ni tan fácil ni tan disponible encontrar arcillas que cumplan con los requisitos de impermeabilidad de proyecto para el caso concreto de Orís. Por otro lado, la alternativa con el material Trisoplast solo hay una empresa especializada en España (*Grupo Terratest*).

En la tabla 4.6, se presenta la evaluación de este indicador en función de las alternativas. En puede observarse que los resultados son bastante arbitrarios. Lo que es cierto es que en el caso de estudio de los vertederos de Manresa y Orís la disponibilidad de la arcilla era mayor que con la solución artificial. Hay que tener en consideración que en otras circunstancias como en Menorca, por ejemplo, no habría disponibilidad de arcilla.

| Disponibilidad | Puntuación sobre uno | Alternativas |
|------------------|----------------------|---|
| Muy elevada | 1 | |
| Bastante elevada | 0,75 | |
| Mediana | 0,50 | Sistema con barrera mineral o tradicional (BMN) |
| Baja | 0,25 | |
| Muy baja | 0 | Sistema con barrera mineral artificial (BMA) |

Tabla 4.6 Comparativo de disponibilidad de las capas impermeabilizantes.

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es lineal creciente porque a medida que aumenta la disponibilidad del material, más sostenible va a ser esa alternativa para la administración. En este caso, se utiliza la función que se muestra en la figura 4.5 con el punto de mínima satisfacción situado en el (0, 0) y el de máxima satisfacción en (0.8, 0).

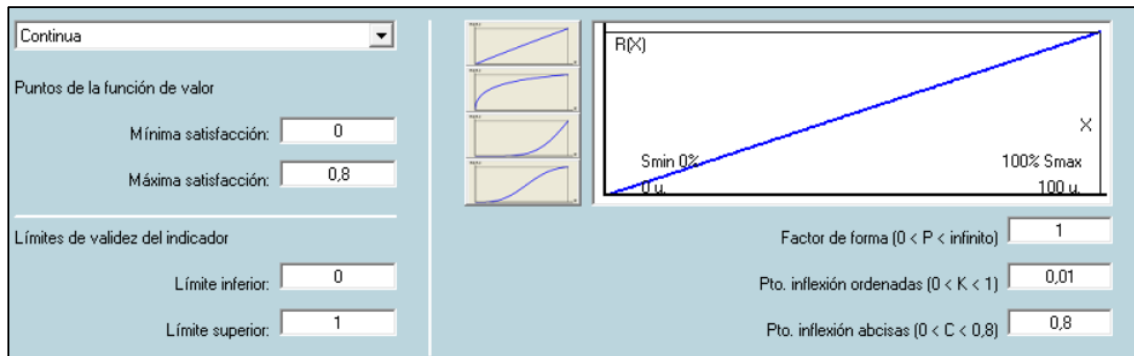


Figura 4.5 Función de valor del indicador Disponibilidad del material. Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.2 Costes a medio y largo plazo (C_2)

Este criterio pretende agrupar aquellos indicadores relacionados con los costos a lo largo de la vida útil de una capa de impermeabilización en el depósito controlado de Orís. En el caso de una capa impermeabilizante de un depósito controlado que no recibe ningún proceso de mantenimiento; solo se procedería a una reparación o a una rehabilitación en el caso de fisura, fallo o que fuera insuficientemente sellante la capa existente. Por lo tanto, dentro de este criterio solo se tiene en consideración un indicador: Costes de reparación (I_3).

4.3.1.2.1 Costes de reparación (I_3)

Objetivo

El indicador de *Costes de reparación* (I_3) pretende comparar, entre las distintas alternativas, aquellos recursos económicos que se necesitarían a lo largo de la vida útil de la infraestructura para reparar los daños habidos en su degradación a lo largo del tiempo.

Estrategia

Desde el punto de vista económico, no sólo se ha considerado los costos iniciales, sino que también se han tenido en cuenta los costes a largo plazo. No hay suficientes datos disponibles como para evaluar correctamente de forma económica (determinar un VAN y TIR por ejemplo) sobre las distintas soluciones: el coste inicial es un dato conocido, pero los costes de mantenimiento no son por ahora disponibles.

Forma de medición

Ante la realidad de que los datos de mantenimiento no son disponibles, se ha creído correlacionar el comportamiento de durabilidad de cada capa sellante con los costes de reparación. Se tiene como hipótesis que cuantas mejores cualidades de

durabilidad disponga un material menor será la probabilidad de degradación a lo largo del tiempo.

En la tabla 4.7, se presenta la valoración de los materiales principales de las alternativas de impermeabilización. Se ha valorado cuatro aspectos de durabilidad que se disponen; y, finalmente, se ha obtenido una valoración de cada aspecto sobre 5.

| Criterios | Arcilla compactada (BMN) | TRISOPLAST (BMA) | VALORACIÓN |
|-------------------------------|---|---|----------------------|
| Agresiones puntuales | Muy resistente | Muy resistente | BMN: 5/5 BMA=5/5 |
| Asientos diferenciales | Poco tolerante y pueden producirse fisuras irreversibles. | Muy tolerante por su comportamiento plástico. | BMN: 2/5 BMA: 5/5 |
| Autoreparación | Inexistente, carece de hinchabilidad. | Muy buena. | BMN: 1/5 BMA: 5/5 |
| Durabilidad | Problemas de desecación y fisuración a medio plazo. | Comprobado a largo plazo mediante estudios. | BMN: 2/5 BMA: 4/5 |
| Media de valoración | 2,5/5 | 4,75/5 | |

Tabla 4.7 Comparativo de durabilidad entre alternativas de capas impermeabilizantes.

Función de valor

La función valor que se propone para este indicador es creciente porque a medida que aumenta la durabilidad, más sostenible va a ser esa alternativa para la administración. En este caso, se utiliza la función lineal creciente tal y como se muestra en la figura 4.6, con el punto de mínima satisfacción situado en el (1.5, 0) y el de máxima satisfacción en (3.5, 0).

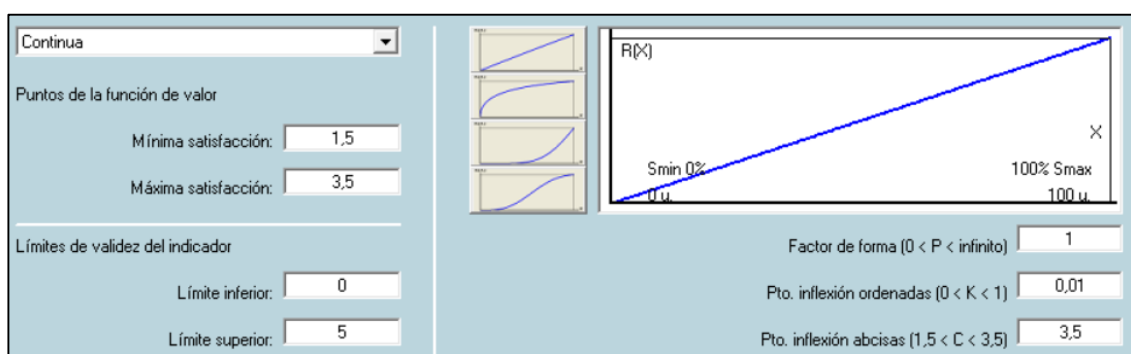


Figura 4.6 Función de valor del indicador costes de mantenimiento. Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 REQUERIMIENTO SOCIAL (R2)

Este requerimiento se utiliza para evaluar cómo repercutiría socialmente la implantación de una capa sellante u otra alternativa en el depósito controlado de Orís. Se establecerán dos criterios básicos: *Necesidad de la Administración (C₃)* e *Impacto social (C₄)*. En la *tabla 4.8*, se muestra la rama perteneciente al requerimiento social:

| Requerimientos (R) | Criterios (C) | Indicadores (I) |
|-------------------------|---|---------------------------------------|
| R ₂ Sociales | C ₃ Necesidad de la Administración | I ₄ Tiempo de construcción |
| | | I ₅ Conocimiento técnico |
| | C ₄ Impacto social | I ₆ Impacto al tráfico |

Tabla 4.8 Rama del requerimiento social.

4.3.2.1 Necesidad de la Administración (C₃)

Este criterio pretende agrupar aquellos indicadores sociales que pueden ser determinantes para la Administración ante su toma de decisión como el tiempo de construcción y el conocimiento técnico de cada alternativa.

4.3.2.1.1 Tiempo de construcción (I₄)

Objetivo

El indicador de *Tiempo de construcción* pretende comparar el plazo constructivo de las distintas alternativas de capas de impermeabilización.

Estrategia

Este indicador puede resultar muy determinante en función de la necesidad de la Administración de disponer de un depósito controlado; o bien, de ampliar uno existente. En algunos casos, cuando más rápido se disponga un depósito controlado a parte de reducir un impacto ambiental, mejor socialmente estará visto por la Administración y la sociedad.

Forma de medición

Para comparar entre las distintas alternativas, se consideran los rendimientos entre los dos métodos para construir un m² de capa sellante, así como se muestra en la *tabla 4.9*. Se ha considerado solo los rendimientos de las actividades de extendido y compactación para las dos alternativas; y la colocación de bentonita para la alternativa de la barrera mineral natural con datos extraídos del banco BETEC.

| | Alternativas de Barrera Mineral | |
|---|-----------------------------------|------------|
| | Natural | Artificial |
| Actividades | Rendimiento (min/m ²) | |
| 1.Extendido y compactado con maquinaria vibratoria en togadas inferiores a 25 cm. | 12,72 | 3,2 |
| 2. Colocación manta de bentonita | 1,2 | - |
| Rendimiento total | 13,92 | 3,2 |

Tabla 4.9 Comparación del tiempo de construcción entre alternativas de capas impermeabilizantes.

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es convexa decreciente porque a medida que aumenta el tiempo de construcción, menor sostenible va a ser esa alternativa para la Administración. En este caso, se utiliza la función convexa tal y como se muestra en la figura 4.7, con el punto de mínima satisfacción situado en el (18, 0) y el de máxima satisfacción en (12, 0).

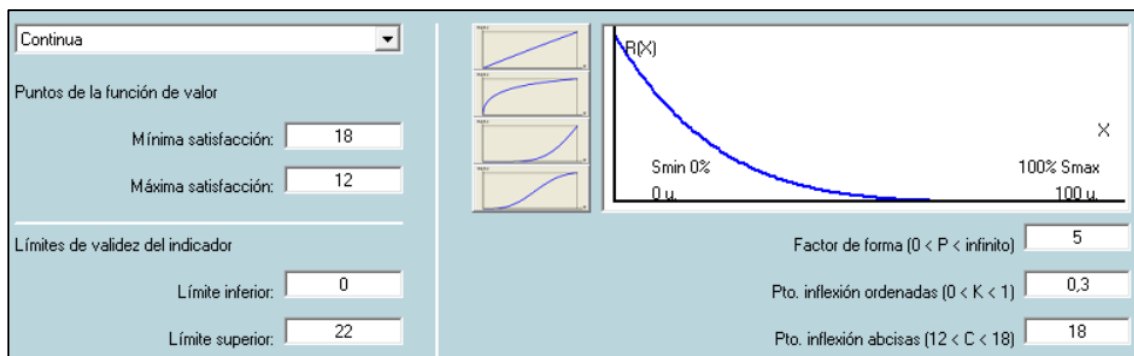


Figura 4.7 Función de valor del indicador Tiempo de construcción (I_4). Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.1.2 Conocimiento técnico (I_5)

Objetivo

El indicador de *Conocimiento técnico* pretende comparar qué grado de conocimiento actual se tiene de cada alternativa por parte de la Administración.

Estrategia

Se tiene que destacar que este indicador actualmente es muy determinante en la decisión de su contratación. Normalmente, a la Administración le es difícil poder considerar una nueva solución con la que no haya trabajado anteriormente por temas de fiabilidad.

Forma de medición

Para evaluar este indicador se tendría que comparar el grado de conocimiento técnico de cada alternativa. No obstante, la evaluación de este indicador, hoy en día, en España resulta muy sencillo, dado que la mayoría de los depósitos controlados en España se han dimensionado con el sistema con barrera mineral natural o tradicional de arcillas compactadas y/o manto de bentonita. En España, sólo un caso se realizó con Trisoplast, por lo que aún el conocimiento por parte de las gestoras de residuos es prácticamente muy bajo.

| Alternativa | Conocimiento Técnico | Valoración |
|---|----------------------|------------|
| Sistema con barrera mineral natural o sistema tradicional | Muy elevado | 1 |
| Sistema con barrera mineral artificial (Trisoplast) | Muy bajo | 0 |

Tabla 4.10 Comparativo de conocimiento técnico entre alternativas de capas impermeabilizantes.

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es lineal creciente porque a medida que aumenta el conocimiento técnico, más sostenible va a ser esa alternativa para la administración. En este caso, se utiliza la función que se muestra en la figura 4.8, con el punto de mínima satisfacción situado en el (0.25, 0) y el de máxima satisfacción en (0.8, 0).

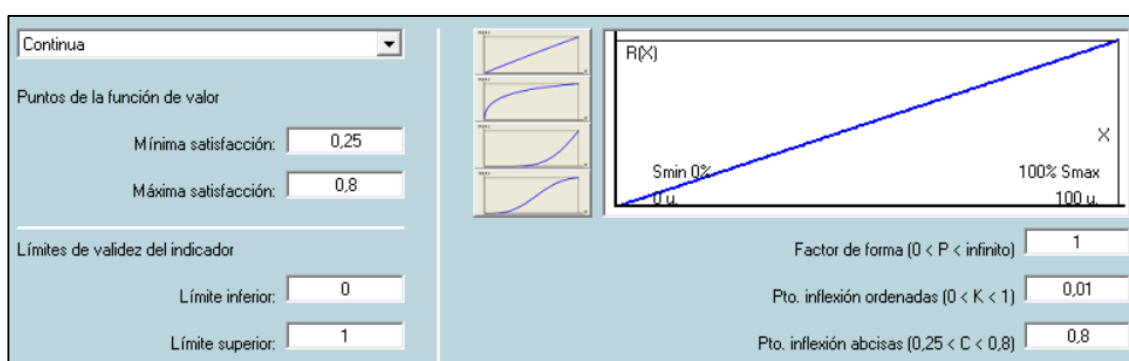


Figura 4.8 Función de valor del indicador Conocimiento técnico (I5). Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.2 Impacto social (C_4)

Este criterio pretende agrupar aquellos indicadores que puedan repercutir a un impacto social debido a la contratación de una capa impermeable en el depósito controlado de Orís. Cabe considerar que, como los depósitos controlados por normativa legal se deben construir en zonas alejadas de las poblaciones, su construcción no supone, como en el caso de Orís, muchos impactos sociales. El único

indicador que sí puede ser relevante y discriminante entre las dos alternativas es el impacto al tráfico; ya que con la solución artificial al disponer de menor cantidad de material se requiere menor número de transportes.

4.3.2.2.1 Impacto al tráfico (I_6)

Objetivo

El indicador de *Impacto al tráfico* pretende comparar qué repercusión sobre el tráfico afectaría la contratación de un sistema de impermeabilización.

Estrategia

Se ha creído necesario la evaluación de este indicador porque entre la solución con el sistema tradicional y el artificial, el volumen de aportación de materiales es muy discriminativo y significativo y por lo tanto el número de transporte de material afectaría al tráfico entre el origen del material y la puesta de obra.

Forma de medición

Para cuantificar este indicador, se ha creído necesario evaluar qué cantidades de materiales son traídos con vehículos pesados (en camión bañera) para la aportación de los materiales de una unidad funcional; es decir, para un m^2 de capa impermeabilizante. Los materiales de transporte que se han considerado, aquellos de mayor relevancia por volumen, han sido la arcilla y la arena para las alternativas de barrera mineral natural y barrera mineral artificial, respectivamente. Los valores obtenidos se presentan en la tabla 4.11.

| Sistema con barrera mineral | Densidad del material (kg/m^3) | Cantidad de material (kg/m^2) | Volumen de material (m^3/m^2) | Volumen relativo por m^2 |
|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| natural (arcilla) | 1900 | 1710,0 | 0,90 | 14,6 |
| artificial(arena) | 1850 | 114,3 | 0,06 | 1,0 |

Tabla 4.11 Comparativo de impacto al tráfico entre alternativas de capas impermeabilizantes.

Como se puede observar, este indicador es muy discriminante entre las dos alternativas y el resultado es lógico si lo analizamos por el espesor que requiere cada alternativa: con la solución tradicional se requiere 90cm de arcilla; mientras que, con la solución artificial solo requiere de 7cm de espesor. Esto repercute a que con la solución natural de arcilla se requiera aproximadamente de 15 veces más transporte de material a obra.

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es convexo decreciente porque a medida que aumenta el tráfico de camiones bañeras menos sostenible va a ser esa alternativa; y, de esta forma se premia en la puntuación que el impacto al tráfico sea el mínimo. En este caso, se utiliza la función convexa tal y como se muestra en la figura 4.9, con el punto de mínima satisfacción situado en el (1.5, 0) y el de máxima satisfacción en (0.15, 0).

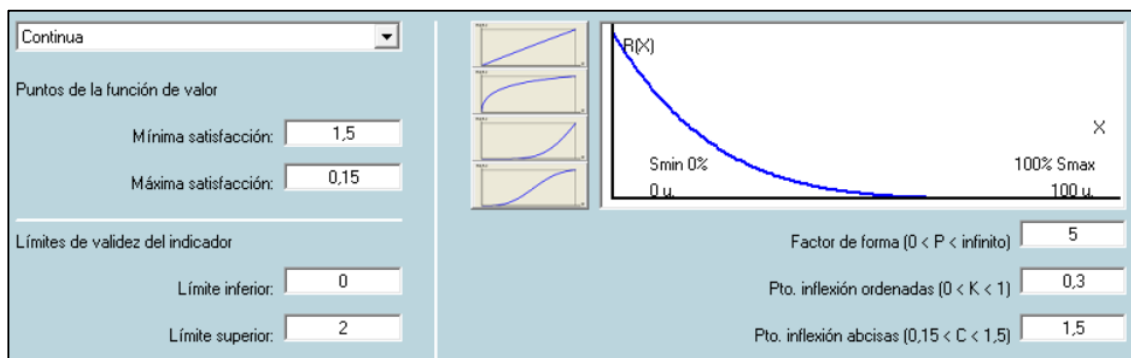


Figura 4.9 Función de valor del indicador Impacto al tráfico (I6). Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 Requerimiento medioambiental (R₃)

Este requerimiento se utilizará para evaluar cómo repercutiría socialmente la implantación de una capa sellante u otra alternativa en el depósito controlado de Orís. Se establecerán dos criterios básicos: *Necesidad de la Administración* (C₃) e *Impacto social* (C₄). En la tabla 4.12, se muestra la rama perteneciente al requerimiento social:

| Requerimiento (R) | Criterio (C) | Indicador (I) |
|-------------------------------|----------------------------------|--|
| R ₃ Medioambiental | C ₅ Impacto ambiental | I ₇ Capacidad de impermeabilización |
| | | I ₈ Análisis de ciclo de vida |

Tabla 4.12 Rama del requerimiento medioambiental.

4.3.3.1 Impacto ambiental (C₅)

Este criterio agrupa aquellos indicadores que evalúan el impacto ambiental como consecuencia de cada alternativa.

4.3.3.1.1 Capacidad de impermeabilización (l_7)

Objetivo

El objetivo de este indicador es determinar qué flujo hidráulico de lixiviados será penetrado en el suelo. Cuanto menor flujo de lixiviados atraviese la capa de diseño, más capacidad de impermeabilización tendrá esa alternativa.

Estrategia

Una de la función principal de una capa de sellante es, sin duda, su propiedad impermeabilizante. Por lo tanto, evaluar el flujo hidráulico de lixiviados que se infiltrará en el suelo en un vertedero es el parámetro determinante del proyecto.

Forma de medición

Como se ha comentado el parámetro fundamental para el dimensionamiento del sistema de sellado e impermeabilización de un vertedero es el Flujo Hidráulico por superficie ($m^3/m^2 \cdot s$). Este parámetro se ha calculado mediante la expresión de Darcy:

$$Q = K \cdot i = K \cdot \left(\frac{e + h}{e} \right)$$

donde: $Q = \text{Flujo hidráulico por superficie } \left(\frac{m^3}{m^2} \cdot s \right)$

$K = \text{Conductividad hidráulica } \left(\frac{m}{s} \right)$

$i = \text{Gradiente hidráulico}$

$e = \text{espesor de la capa}$

$h = \text{carga hidráulica}$

A continuación, se presenta en la tabla 4.13 el comparativo del flujo hidráulico a través de la capa, en función de la permeabilidad de la capa, el espesor de la misma y considerando una carga hidráulica de 0,5m de altura estimada a efectos comparativos, entre las distintas soluciones para el vertedero de Orís.

De la tabla 4.13, se obtiene que para el vertedero del Orís, la solución del Trisoplast permite un caudal de filtración de líquidos lixiviados 3 veces menor que con el sistema tradicional con arcillas compactadas y lámina de bentonita. Es decir, el Trisoplast sería 3 veces más impermeable y sellante que con el sistema tradicional previsto en proyecto.

| Parámetros | Sistema con barrera mineral natural (Arcilla + bentonita) | | Sistema con barrera mineral artificial (Trisoplast) |
|---|--|---------------------|--|
| Espesor (m) | 1ª capa (bentonita) | 0,006 | 0,07 |
| Conductividad hidráulica(m/s) | | 2×10^{-11} | 3×10^{-11} |
| Espesor (m) | 2a capa (arcilla) | 0,9 | |
| Conductividad hidráulica(m/s) | | 5×10^{-10} | |
| Carga Hidráulica (m) | 0,5 | | |
| Gradiente hidráulico (i) | 1,6 | | 8,1 |
| Flujo a través de la capa (mm/año) | 23,3 | | 7,7 |
| Caudal relativo | 3,02 | | 1 |

Tabla 4.13 Comparativo de contaminación al suelo entre alternativas de capas impermeabilizantes.

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es convexo decreciente porque a medida que aumenta la contaminación del suelo, menos sostenible va a ser esa alternativa para la Administración. En este caso, se utiliza la función convexa tal y como se muestra en la figura 4.10, con el punto de mínima satisfacción situado en el (35, 0) y el de máxima satisfacción en (20, 0).

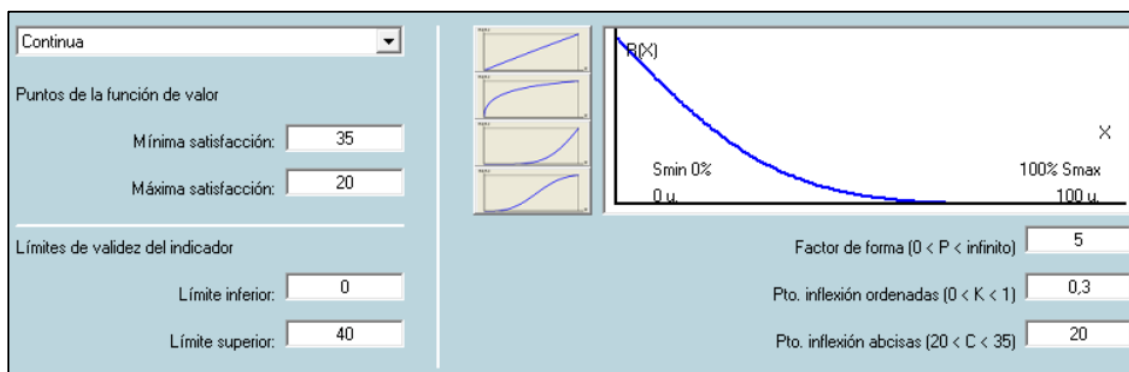


Figura 4.10 Función de valor del indicador Capacidad de impermeabilización (I7). Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.1.2 Análisis de ciclo de vida (I₈)

Objetivo

El objetivo de este indicador es comparar los resultados del análisis de ciclo de vida realizado con SimaPro con la metodología ReCiPe Endpoint (H) V1.13 / Europe ReCiPe H/H entre las distintas alternativas.

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

Estrategia

El análisis de ciclo de vida es hoy en día una metodología muy útil para la evaluación del impacto ambiental de un producto, proceso, servicio, así como para comparar el impacto ambiental de varias alternativas que cumplan una misma unidad funcional. Además, este indicador es discriminante y relevante entre las dos alternativas.

Forma de medición

Para medir este indicador, se ha realizado un análisis de ciclo de vida con el programa SIMAPRO utilizando la metodología ReCiPe Endpoint (H) V1.13 / Europe ReCiPe H/H entre las distintas alternativas. Esta evaluación se basa en 3 indicadores end-points: salud humana, ecosistemas y recursos. La metodología del programa permite obtener una puntuación única para cada alternativa en función de los pesos de los end-points obtenidos. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.14.

| Alternativas | Puntuación única ACV (SimaPro) |
|---|--------------------------------|
| Barrera mineral natural o tradicional | 7,84 |
| Barrera mineral artificial (Trisoplast) | 1,07 |

Tabla 4.14 Comparativo de puntuación única ACV entre alternativas.

Función de valor

La función de valor que se propone para este indicador es decreciente porque a medida que aumenta la puntuación del ACV, menos sostenible va a ser esa alternativa para la administración. Esto se muestra en la figura 4.11, con el punto de mínima satisfacción situado en el (10, 0) y el de máxima satisfacción en (1, 0).

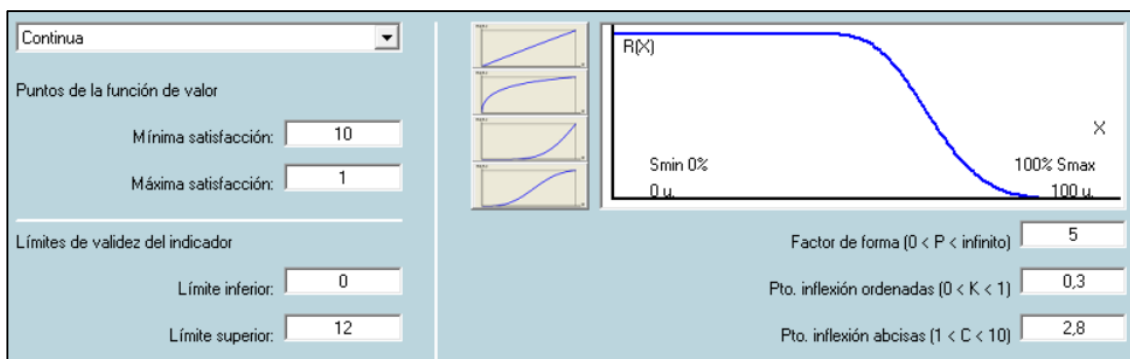


Figura 4.11 Función de valor del indicador Análisis de ciclo de vida (I8). Fuente: Elaboración propia.

4.4 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN

4.4.1 Introducción

En los anteriores apartados de este capítulo, se desarrolló y se explicó detalladamente la metodología de evaluación de sostenibilidad. Asimismo, se desarrolló el árbol de requerimientos; se cuantificó todos aquellos aspectos discriminantes entre las dos alternativas: los indicadores. Una vez ponderadas todas las ramas del árbol: requerimientos, criterios e indicadores y cuantificados todos los indicadores, se procede a la resolución final de la evaluación en este capítulo. Es decir, en este apartado se procede a evaluar el índice de sostenibilidad de cada alternativa según las hipótesis descritas en capítulos anteriores. Además, como se ha comentado anteriormente en el capítulo 4, se ha tomado como solución principal aquella que considera los pilares de la sostenibilidad (económico, social y ambiental) con peso equitativo. No obstante, para estudiar con mayor amplitud los resultados, se ha creído interesante realizar un análisis de sensibilidad variando los pesos de cada requerimiento: mediante la priorización económica, social y ambiental. De esta forma, se puede analizar los distintos dominios donde una solución es mejor o peor respecto a la otra.

4.4.2 Introducción de datos

Una vez cuantificados los indicadores en los pasados apartados, se procede en éste a realizar una tabla de valores donde se recogen los datos obtenidos de forma clara y sintética como se puede ver en la tabla 4.15 para así, posteriormente, poderlos evaluar y obtener un resultado final comparativo entre las dos alternativas mediante la metodología MIVES.

En esta tabla, se puede apreciar tanto los resultados de la cuantificación de cada indicador para cada alternativa como las funciones valores, los límites inferiores y superiores que se han tomado y que por lo tanto son arbitrarios a criterio del evaluador.

| Requerimiento (R) | Indicadores (I) | Barrera Mineral Natural | Barrera Mineral Artificial | Unidades | Función de valor | Límite inferior | Límite superior |
|--------------------------|--|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| R ₁ Económico | I ₁ Inversión inicial | 22 | 14 | €/m ² | Convexo decreciente | 5 | 40 |
| | I ₂ Disponibilidad del material | 0,5 | 0 | 0-1 | Lineal creciente | 0 | 1 |
| | I ₃ Costes de mantenimiento | 2,5 | 4,75 | 1-5 | Lineal creciente | 0 | 5 |
| R ₂ Social | I ₄ Tiempo de construcción | 13,9 | 3,2 | min/m ² | Convexo decreciente | 0 | 22 |
| | I ₅ Conocimiento técnico | 1 | 0 | 0-1 | Lineal creciente | 0 | 1 |
| | I ₆ Impacto al tráfico | 0,9 | 0,06 | m ³ /m ² | Convexo decreciente | 0 | 2 |
| R ₃ Ambiental | I ₇ ACV | 7,84 | 1,07 | Pt SimaPro | Convexo decreciente | 0 | 12 |
| | I ₈ Contaminación del suelo | 23,3 | 7,7 | mm/año | Convexo decreciente | 0 | 40 |

Tabla 4.15 Introducción datos de los indicadores y su función de valor.

4.4.3 Obtención del resultado final

Una vez se han cuantificado los indicadores y se han introducido en el *MIVES Usuario* se procede a obtener los resultados finales de la evaluación de sostenibilidad en el *MIVES Report*. Como se ha comentado anteriormente, las ponderaciones de los requerimientos se han tenido en cuenta desde el punto de vista de la sostenibilidad considerando un equilibrio equitativo entre los requerimientos económicos, sociales y medioambientales con lo que ($\lambda(R_i) = 0,33$; $i = 1, 2, 3$). Los índices de sostenibilidad que se han obtenido para cada alternativa han sido 0,434 para la solución con barrera mineral natural; y, 0,755 para la solución con barrera mineral artificial como se presentan en la tabla 4.16.

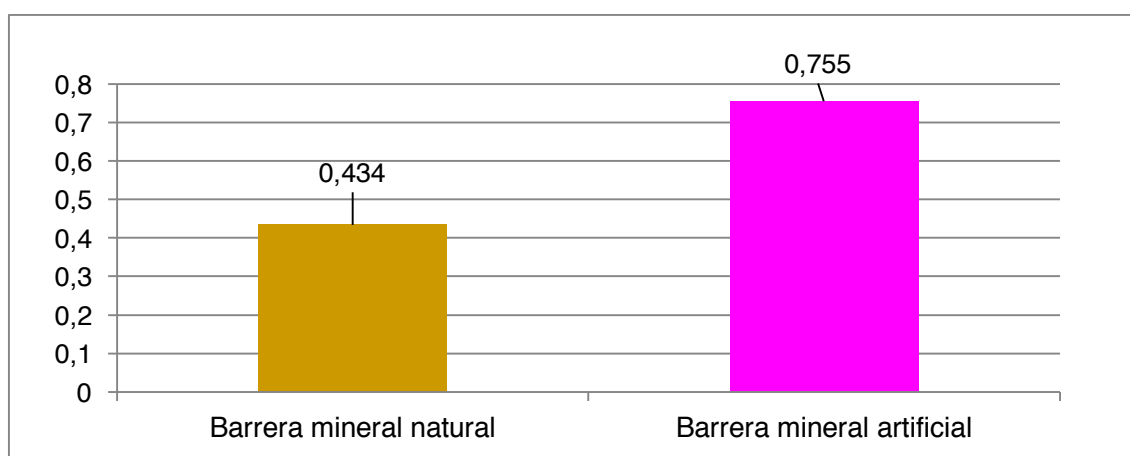


Tabla 4.16 Índices de sostenibilidad de las alternativas: Barrera mineral natural y barrera mineral artificial.
Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar en la tabla 4.16, según la cuantificación y elección de los indicadores y de los pesos que se le han asignado a cada rama del árbol, se ha obtenido que la solución con barrera mineral artificial (Trisoplast) es mejor solución, como sistema de impermeabilización del depósito controlado de Orís, desde el punto de vista de la sostenibilidad que la solución con barrera mineral natural o tradicional.

Con la intención de mejorar la interpretación de los resultados obtenidos del MIVES, se presenta la puntuación de cada requerimiento y de cada indicador respecto a la puntuación total para cada alternativa en las figuras 4.12 y 4.13, respectivamente.

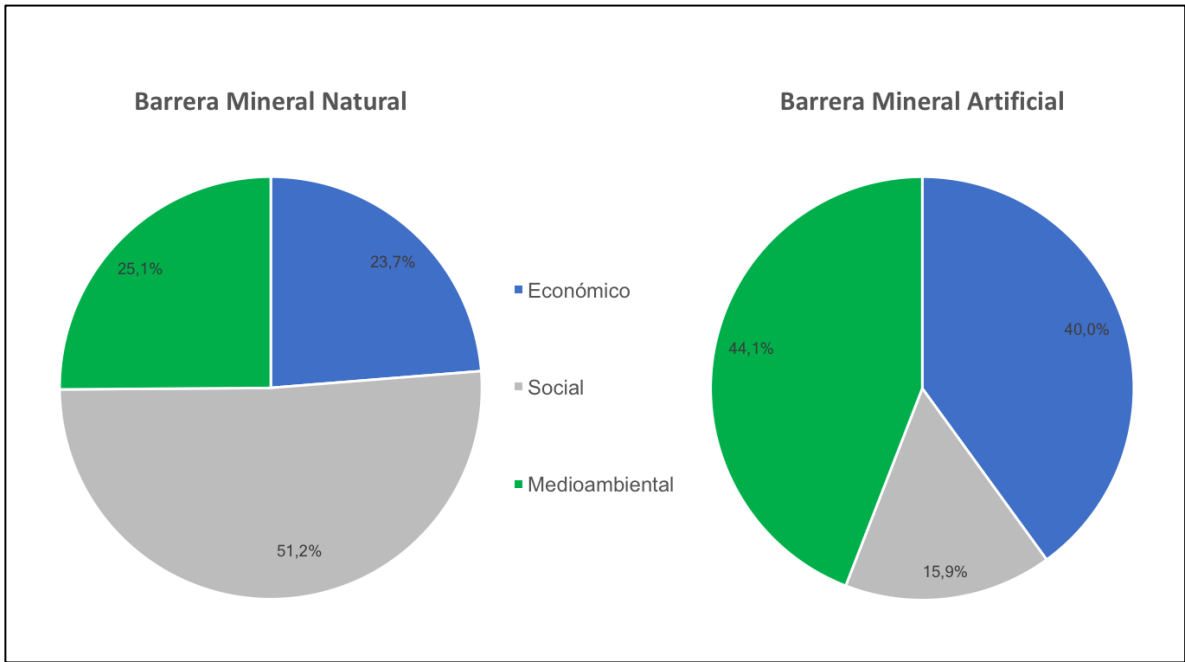


Figura 4.12 Proporción de puntuación de cada requerimiento respecto a la solución final. Fuente: Elaboración propia.

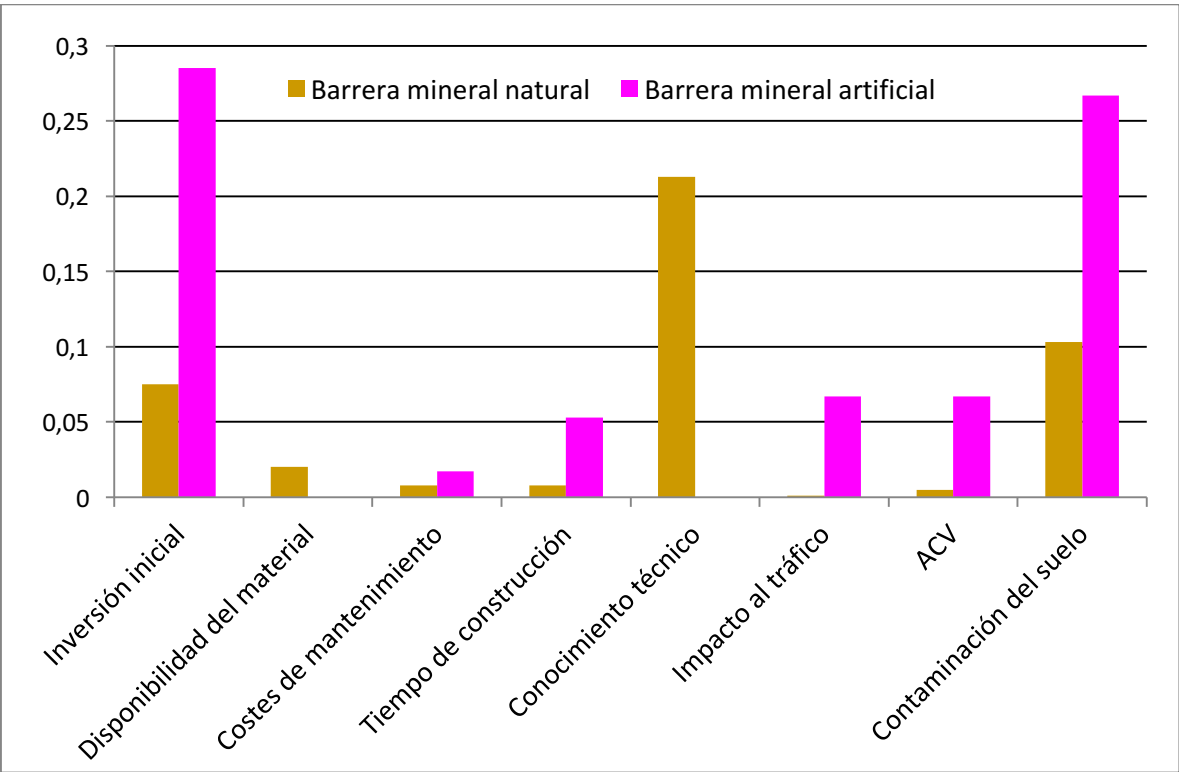


Figura 4.13 Valoración de cada indicador respecto a la puntuación final. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, por un lado, respecto a la alternativa de barrera mineral natural, el requerimiento que le ha aportado mayor puntuación es el social; lo cual es lógico porque el indicador social de mayor peso era el conocimiento técnico de la solución y la Barrera mineral natural o tradicional es aquella solución más utilizada y conocida. Por otro lado, de la alternativa de barrera mineral artificial los requerimientos dominantes han sido los económicos y ambientales, lo cual es lógico si lo comparamos con las cuantificaciones de los indicadores. Los indicadores de mayor peso eran Inversión inicial en el requerimiento económico y Capacidad impermeabilizante en el requerimiento medioambiental; y en esos dos indicadores, la solución con barrera mineral artificial había obtenido mayor puntuación.

4.4.4 Análisis de sensibilidad

Con tal de validar los resultados obtenidos y verificar la robustez del modelo programado, se ha realizado un análisis de sensibilidad considerando 3 casos adicionales al estudiado anteriormente: priorización económica, priorización social y priorización ambiental. Los resultados de este análisis de sensibilidad se presentan en la tabla 4.17 y en la figura 4.14:

| Casos de estudio | Pesos requerimientos | | | Índices de sostenibilidad | |
|---------------------------|----------------------|--------|-----------|---------------------------|-------|
| | Económico | Social | Ambiental | BMN | BMA |
| 1. Equitativo | 33% | 33% | 33% | 0,434 | 0,755 |
| 2. Priorización económica | 50% | 25% | 25% | 0,402 | 0,793 |
| 3. Priorización social | 25% | 50% | 25% | 0,492 | 0,756 |
| 4. Priorización ambiental | 25% | 25% | 50% | 0,407 | 0,816 |

Tabla 4.17 Resultados análisis de sensibilidad.

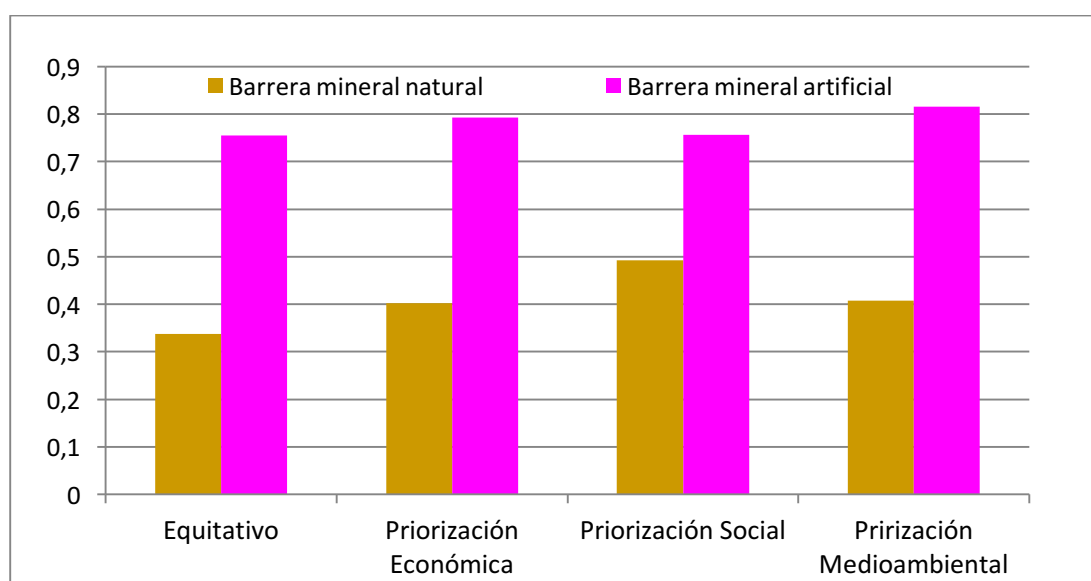


Figura 4.14 Resultados análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en los resultados del análisis de sensibilidad presentados anteriormente, se puede constatar que la solución más sostenible de capa impermeabilizante para el caso del vertedero de Orís ha sido la solución con barrera mineral artificial (Trisoplast); tanto para el caso equitativo como para las priorizaciones económicas, sociales y ambientales.

Se observa que la barrera mineral natural obtiene mayor puntuación en la priorización social; lo cual es lógico ya que el indicador social de mayor peso es el conocimiento técnico y la solución tradicional con arcilla es aquella más conocida y utilizada en nuestro país. No obstante, si observamos la figura 4.13, vemos que la barrera mineral artificial también tiene como favorables los indicadores sociales de Tiempo de construcción e Impacto al tráfico. Es por eso, que, aunque se ha considerado una priorización social, la distancia entre las dos alternativas se ha acortado, pero no lo suficiente para que la barrera mineral natural sea más sostenible que la artificial para el caso de estudio.

Finalmente cabe mencionar que los resultados de la evaluación de sostenibilidad son para un caso concreto de estudio, como hemos visto, del depósito controlado de Orís en nuestro caso. Eso no significa que para otros vertederos o depósitos controlados la solución con barrera mineral artificial tenga que ser más sostenible que con la barrera mineral natural; todo dependerá de las condiciones de contorno y de las circunstancias del caso de estudio, y por tanto este estudio no pretende ser una evaluación de sostenibilidad genérica entre las capas de impermeabilización de depósitos controlados.

4.4 CONCLUSIONES

En primer lugar, se ha conseguido desarrollar una metodología de toma de decisión para comparar qué alternativa de sistema de impermeabilización para el caso concreto del depósito controlado de Orís era mejor desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Respecto a la metodología propuesta, comentar que se ha mejorado considerablemente los conocimientos con las herramientas del MIVES para la evaluación de sostenibilidad y SIMAPRO para el análisis de ciclo de vida; y, por lo tanto, se ha aprendido a utilizar metodologías que facilitan la toma de decisión entre distintas alternativas. Tanto para el buen funcionamiento del método del MIVES (evaluación de sostenibilidad) como para el SIMAPRO (análisis de ciclo de vida) es fundamental la buena definición de la unidad funcional que se quiere comparar; así como, los límites del sistema y las hipótesis consideradas para cada alternativa. De este modo, la comparación es más concreta, tiene más rigor y es más justificable.

En segundo lugar, destacar la importancia de la buena elaboración del desarrollo del árbol de valores; y, sobre todo, de la elección de los indicadores que acaban siendo aquellos parámetros evaluables y que condicionan el resultado final. Si se analiza y se enfoca bien la elección de los indicadores, ésta puede llegar a ser racional. Los indicadores tendrían que ser aquellos que fueran realmente significativos, relevantes y discriminantes entre las alternativas a comparar.

En tercer lugar, recalcar que la evaluación de sostenibilidad tiene un gran componente arbitrario: la asignación de los pesos de los requerimientos, las funciones valores, los límites inferiores y superiores son arbitrarios a criterio del evaluador. No obstante, aunque haya una cierta arbitrariedad en la evaluación; ésta es o debería ser transparente y justificada con lo que permitiría que otro evaluador con otro criterio fuera capaz de modificar su evaluación. Además, una manera de reducir esta arbitrariedad en los resultados como evaluador sería realizar un análisis de sensibilidad de la forma más extensa posible; entendiendo que a mayor dominio de variabilidad del análisis de sensibilidad menos arbitrario resultaría ser la solución del problema.

En cuarto lugar, entender que la metodología propuesta pueda darse de dos formas distintas: una, realizada de manera que la solución sea única; por ejemplo, en el caso de una licitación de un proyecto; y, otra, una solución de dominio donde en función de unas variables, como pueden ser la asignación de los pesos, una alternativa sería mejor que otra.

En quinto lugar, en cuanto a la evaluación de sostenibilidad entre las dos alternativas (barrera mineral natural y artificial) de los sistemas de impermeabilización para el caso concreto del depósito controlado de Orís cabe decir que:

A nivel económico, en cuanto a la inversión inicial, la diferencia del precio por m^2 de la construcción entre la barrera mineral artificial y la mineral es muy significativa. Esto es, por un lado, porque en Orís la localización de arcillas que cumplan con los requisitos de permeabilidad del proyecto se sitúan lejos del depósito; consecuentemente, los costes de transporte del suministro del material aumentan considerablemente. Por otro lado, la diferencia de cota entre la barrera mineral y la artificial es de 80 cm, lo que conlleva a un incremento de excavación mediante voladuras. Es por esto que, aunque el material Trisoplast sea un material que volumétricamente es mucho más caro que la arcilla, en el caso concreto de Orís, resulta ser la solución con menor inversión inicial.

En cuanto a costes a medio y largo plazo, aunque la realidad de que los datos de mantenimiento no son disponibles, se ha correlacionado el comportamiento de durabilidad de cada capa sellante con los costes de reparación. Como hemos visto en la tabla 4.7, la barrera mineral artificial era mejor en los criterios de durabilidad, más tolerante ante asientos diferenciales por su comportamiento plástico, mayor capacidad de autoreparación y durabilidad.

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

Una de las desventajas de la solución con la barrera mineral artificial hoy en día es la falta de disponibilidad en el mercado. Actualmente, en España, solo hay una empresa que patente la colocación de este material por lo que se puede estar limitado en la ejecución si esta empresa tuviera mucha demanda de obras y; consecuentemente, podría tener el monopolio sobre los precios. Otra de las desventajas de la barrera mineral artificial frente a la barrera mineral natural es que ésta última es un material compuesto básicamente por unas capas de arcillas disponible en muchas zonas de España. No obstante, un impedimento de la barrera mineral natural puede ser que las arcillas suministradas no dieran los requisitos de permeabilidad del proyecto lo que supondría tener que, o bien, incrementar el grosor de arcillas (encareciendo la solución), o bien, disponer de otra lámina de bentonita para incrementar la capacidad sellante del sistema.

A nivel social, se ha determinado que la colocación de la barrera mineral artificial (Trisoplast) es una solución de mayor rendimiento constructivo que la solución con la barrera mineral natural. Entre otros motivos, como se ha comentado anteriormente, la diferencia de espesor entre la barrera mineral natural y la artificial es de 80 cm en un vaso de excavación que se debe realizar mediante voladuras. Por ello, es interesante considerar, que una solución sea más rápida, al terminarse las obras antes de plazo, puede resultar en alguna situación muy satisfactoria desde el punto de vista del cliente. Por ejemplo, en el caso de tener alguna reparación de un depósito por cuestión de fugas de lixiviado, puede resultar ser una solución resolver el problema rápidamente.

El indicador social más desfavorable de la barrera mineral artificial es la falta de conocimiento técnico respecto a la barrera mineral natural; puesto que la barrera mineral artificial es la menos usada en España. Esto conlleva a la incertidumbre, por parte de la dirección de la obra; y, consecuentemente, el hecho de no querer asumir un riesgo por emplear un material nuevo respecto al tradicional. Este motivo es la razón por la cual se desestimó la ejecución de la alternativa con barrera mineral artificial en la ampliación del depósito de Orís.

Asimismo, en la evaluación de los indicadores sociales, también se ha determinado que el impacto al tráfico de la solución con la barrera mineral natural es mucho más significativo que con la barrera mineral artificial. Esto es porque la barrera mineral natural requiere 15 veces más material proveniente de camiones bañeras que con la barrera mineral artificial.

A nivel medioambiental, por una parte, se ha determinado que la barrera mineral artificial (Trisoplast) de un espesor de 7 cm es 3 veces más sellante que la barrera mineral natural con un dimensionado de 90 cm de arcillas compactadas más una lámina de bentonita. Es decir, el flujo anual que traspasaría la capa sellante en el caso de barrera mineral artificial sería 3 veces menor que con la barrera mineral natural o tradicional. Por otra parte, se ha realizado un análisis de ciclo de vida para

comparar las dos alternativas mediante el programa SIMAPRO utilizando la metodología ReCiPe Endpoint (H) V1.13 / Europe ReCiPe H/. Esta evaluación se ha basado en 3 indicadores end-points: salud humana, ecosistemas y recursos. La metodología del programa permite obtener una puntuación única para cada alternativa en función de los pesos de los end-points obtenidos. Los resultados del análisis del ciclo de vida han sido que la barrera mineral natural obtiene una puntuación de 7 veces más contaminante que la solución con barrera mineral artificial. Estos resultados son lógicos entendiendo que la diferencia de espesor para garantizar la misma unidad funcional es muy significativa; la barrera mineral natural dispone de un espesor de prácticamente 13 veces superior y, por lo tanto, necesita de mucho más transporte de material y también necesita mayor incremento de excavación para disponer de la misma cota de acabado.

Finalmente, cabe mencionar que los resultados de la evaluación de sostenibilidad son para un caso concreto de estudio; es decir, para la ampliación de la tercera fase del depósito controlado de Orís. Esto no significa que para otros vertederos o depósitos controlados la solución con barrera mineral artificial tenga que ser más sostenible que con la barrera mineral natural; todo dependerá de las condiciones de contorno y de las circunstancias del caso de estudio; y por lo tanto este estudio no pretende ser una evaluación de sostenibilidad genérica entre las capas de impermeabilización de depósitos controlados.

Esta reflexión es importante de cara a las evaluaciones de sostenibilidad. Se pueden realizar evaluaciones de sostenibilidad de carácter genérico como ejercicios académicos, pero en casos reales y prácticos carecerían de rigor. Es sumamente importante las condiciones de contorno, los alcances y límites del problema, las hipótesis consideradas, puesto que cuanto más concreto es el problema más real se vuelve la comparación y evaluación entre dos alternativas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores, se ha estudiado el proceso de la gestión de residuos urbanos desde la recogida hasta el tratamiento; focalizándose al final en el estudio de los depósitos controlados. También se han estudiado las dos alternativas planteadas como soluciones de impermeabilización de la tercera fase del depósito controlado de Orís; y, se ha realizado una evaluación de sostenibilidad entre las dos alternativas mediante la metodología MIVES.

El objetivo del presente capítulo es presentar las conclusiones generales y específicas; así como algunas recomendaciones que se han obtenido en la realización de este trabajo.

5.2 CONCLUSIONES GENERALES

La conclusión general del trabajo realizado en respuesta al objetivo general propuesto es que se ha podido realizar con éxito una evaluación de sostenibilidad entre las dos alternativas planteadas de sistema de impermeabilización del depósito controlado de Orís (barrera mineral natural y barrera mineral artificial).

Para llegar a este resultado se ha propuesto un modelo de decisión multicriterio, que incorpora los tres pilares principales de la sostenibilidad (aspectos económicos, sociales y ambientales). Este modelo se implementado en la práctica mediante el programa MIVES, desarrollado y disponible en la UPC.

El resultado de la evaluación de sostenibilidad es que la alternativa con barrera mineral artificial resulta ser más sostenible que la barrera mineral natural (prevista en proyecto) para el caso concreto de la tercera ampliación del depósito controlado de Orís.

5.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

En lo que sigue se presentan las principales conclusiones específicas, resultantes del estudio:

- 1ª. Según los datos de Eurostat del 2013, que en España el 60% del peso de los residuos urbanos tiene como tratamiento finalista los depósitos controlados. Si lo comparamos con la media de la Unión Europea, este porcentaje es el doble (31%). Respecto a los datos con Alemania o Suiza, observamos que en estos países el vertido es prácticamente nulo y la destinación de los residuos urbanos son mediante procesos de valorización como: la incineración, el reciclado y el compostaje. No obstante, como ventajas respecto a los demás tratamientos finalistas, los depósitos controlados son la solución técnica más sencilla en comparación con los demás tratamientos finalistas y requieren una menor inversión inicial.

Teniendo en cuenta el contexto histórico -que hasta la década de los 90 a nivel europeo no había una concienciación ambiental respecto a la gestión ambiental de los residuos urbanos; y que, a nivel nacional, en España, abundaban los vertederos incontrolados- es entendible que, posteriormente, se iniciaran las soluciones de tratamiento finalistas con la construcción de soluciones más sencillas y económicas como los depósitos controlados. Las desventajas de los depósitos controlados respecto a otros tratamientos son su elevado consumo del terreno; además, se enfrentan a un gran rechazo social por parte de la ciudadanía; contiene una alta cantidad de residuos que podrían haber sido valorizados y presenta una serie de múltiples impactos ambientales como: la contaminación de acuíferos, contaminación de aguas superficiales, contaminación atmosférica, contaminación odorífera, emisión de polvo y partículas sólidas, presencia de patogenias y degradación del paisaje.

La mayoría de estos impactos ambientales son consecuencias de las sustancias contaminantes que se generan en mayor medida en los depósitos controlados: el biogás y los lixiviados. Por ello, es fundamental, en un depósito

controlado, el buen sellado e impermeabilización de la base, el buen diseño de la gestión del biogás y de los lixiviados.

- 2ª. Se ha estudiado la importancia del buen diseño y funcionamiento del sistema de captación; y del tratamiento y eliminación del biogás; puesto que, el metano presente en el biogás de vertederos es considerado como una de las más importantes fuentes de emisiones de efecto invernadero, tanto en la unión europea como a nivel mundial. Así pues, la reducción de las emisiones difusas de biogás de vertedero constituye una medida altamente eficiente para la reducción de dichos gases.

Los depósitos controlados biorreactores con gestión microbiológica permiten regular e incrementar la descomposición de la materia orgánica presente en los residuos urbanos por lo que reducen la edad de los depósitos controlados de 30 a 10 años; y, aumentan el aprovechamiento del biogás con lo que se obtiene mayor rentabilidad energética. Asimismo, reducen la carga de gases de efecto invernadero presentes en el biogás (metano y dióxido de carbono); permiten aprovechar entre el 10-20% del espacio para depositar residuos gracias al incremento de la descomposición de la materia orgánica. En cambio, requieren incrementos de costes iniciales del diseño, construcción y operación del biorreactor con respecto a los convencionales; así como, requieren mayor seguimiento técnico para controlar la adición de lixiviado, la estabilidad del vertedero y la generación del biogás.

- 3ª. Respecto al tratamiento de los lixiviados en un depósito controlado, cabe decir que la selección del proceso más adecuado para el tratamiento del lixiviado varía en función de las características del propio lixiviado: de su composición química, del medio receptor de los efluentes tratados, de los límites legales de vertido, de factores técnicos y aspectos económicos como la inversión y los costes de explotación. En el momento que se requiere la instalación de una planta de tratamiento de lixiviado se debe realizar un estudio de viabilidad y seleccionar la mejor tecnología disponible. Dada la complejidad química de los lixiviados; normalmente, el tratamiento adecuado implica una combinación de distintas tecnologías.
- 4ª. Dada la importancia del emplazamiento de los depósitos controlados, se han estudiado dos modelos de selección: el modelo KUN(Gijsberts,1992) y el modelo de los mapas de orientación al vertido por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). El modelo KUN utiliza tres criterios para la selección del emplazamiento de un vertedero. El primer criterio excluye aquellas zonas que urbanísticamente son inaceptables. El segundo criterio delimita aquellas zonas donde se encontraría el depósito controlado cerca de vías de comunicación y de núcleos de generación de residuos. Y el tercer criterio evalúa las zonas según: criterios medioambientales, de organización territorial, paisajísticos y económicos con tal de obtener el emplazamiento óptimo.

El modelo de los mapas de orientación al vertido por el IGME tiene un carácter más geotécnico-hidráulico y nos distingue entre tres zonas de delimitación: las favorables al vertido, las desfavorables y aquellas que requieren estudios complementarios.

- 5ª. En relación al sistema de sellado e impermeabilización, el grado de protección de la base depende de tres aspectos principales: las características hidrogeológicas, las características del suelo y la construcción del sellado. Para determinar un cierto nivel de control de protección existe una situación de referencia que se debe cumplir y, por el contrario, unas condiciones inadecuadas que se deben evitar. En el caso de encontrarnos en situaciones inadecuadas se han presentado unas medidas correctoras en función de la anomalía.
- 6ª. Con respecto a las condiciones de contorno del depósito controlado del municipio de Orís, en la comarca de Osona, en la provincia de Barcelona, se destaca su ubicación próxima a la red vial C-17 que es sin duda una infraestructura que trabaja como una espina dorsal en la economía de la comarca. Los sectores predominantes de la comarca son: la industria agroalimentaria, el sector metal-mecánico y el sector de logística y transporte de mercancías. Dado que la conexión ferroviaria de mercancías es inexistente y que la única vía de transporte es la red viaria, ha sido importante ponderar positivamente aquella alternativa que repercuta con el menor impacto al tráfico sobre esta vía de circulación.

Desde el punto de vista social de la comarca, se ha observado que la situación de los datos de la tasa de paro de Osona son más positivos que la media catalana; pero, si lo comparamos con otros países de la Unión Europea como Alemania, Dinamarca o Países Bajos, observamos que la tasa del paro de Osona es del doble respecto a estos países de la Unión Europea. Por ello, considero importante, de cara a la toma de decisión por parte de la Administración, considerar la generación de empleo en la evaluación de alternativas de proyectos en el caso que sea discriminante. Pero, en nuestro caso de estudio, la generación de empleo de las soluciones impermeabilización del depósito no ha sido discriminante y, por lo tanto, no se ha considerado en la evaluación de sostenibilidad.

Desde un punto de vista técnico en relación a los terrenos de ubicación del depósito controlado de Orís, comentar que según los estudios geotécnicos realizados por el Grup Subsól, el depósito controlado de Orís se apoya sobre un terreno de Calcolutites de roca dura. Por lo tanto, el terreno no es excavable mediante retroexcavadoras y, consecuentemente, la excavación se realiza mediante voladuras. De este modo, el resultante de la excavación con voladuras son grandes rocas que no son fáciles de manejar y requieren la

utilización de machacas para poder aprovechar este material como terraplén; por lo que, estamos hablando que en el depósito controlado de Orís dadas las circunstancias del terreno nos encontramos en una situación donde resulta ser costosa tanto la excavación como el manejo posterior de los materiales resultantes. En consecuencia, aquellas alternativas que permitan reducir la cantidad de excavación por su menor grosor de capa permitirán reducir los costes de construcción. También cabe considerar que, en los sondeos realizados por el estudio geotécnico, no se halló ningún nivel freático; por lo tanto, podemos corroborar que la ubicación del depósito controlado es correcta medioambientalmente dado que se evita la interacción con aguas subterráneas.

En relación al marco legal en el cual nos encontramos ante la ejecución de la ampliación del depósito controlado de Orís como hemos visto es el DECRET 1/1997, 7 de enero, *sobre la disposición de los residuos en los depósitos controlados de la Generalitat de Catalunya para residuos de clase II*. En este marco, se recomienda unos criterios de construcción del sistema de impermeabilización. Legalmente se permite el dimensionamiento de cualquier otro sistema de impermeabilización artificial propuesto por la entidad explotadora del depósito controlado si ofrece garantías funcionales similares al sistema de referencia según decreto.

- 7ª. En relación al dimensionamiento del sistema de impermeabilización y sellado del depósito controlado de Orís, se han considerado dos alternativas: una, la barrera mineral natural y, otra, la barrera mineral artificial. La barrera mineral natural o también conocida como tradicional es aquella que se ha utilizado en la mayoría de los depósitos controlados de España. Se compone por tres capas de materiales: una primera capa, arcillas compactadas en la capa en contacto con el terreno o con la superficie de apoyo; una segunda capa, manta de bentonita (GCL) en el medio y una tercera y superior capa, geomembrana impermeable de PEAD en contacto con las capas drenantes del depósito.

Esta solución es interesante en la mayoría de los casos dada la disponibilidad del suministro de la arcilla. No obstante, en el caso del depósito controlado de Orís, el suministro de las arcillas que cumplieran con los requisitos de permeabilidad resultaba ser costoso por la lejanía de los proveedores; razón por el cual se estudió la viabilidad de otra solución como es la impermeabilización de la base con la barrera mineral artificial que utiliza un material denominado comercialmente como Trisoplast. Este material se desarrolló en Holanda por la falta de disponibilidad de arcillas en este país. El Trisoplast está compuesto de una arena bentonítica modificada con polímero que permite substituir tanto la capa de las arcillas compactadas como la manta de bentonita de la barrera mineral natural; aunque se hace igualmente necesaria la colocación encima de la geomembrana de PEAD.

8ª. Respecto a la metodología propuesta, comentar que se ha mejorado considerablemente los conocimientos con las herramientas del MIVES para la evaluación de sostenibilidad y SIMAPRO para el análisis de ciclo de vida; y, por lo tanto, se ha aprendido a utilizar metodologías que facilitan la toma de decisión entre distintas alternativas. Tanto para el buen funcionamiento del método del MIVES (evaluación de sostenibilidad) como para el SIMPAPRO (análisis de ciclo de vida) es fundamental la buena definición de la unidad funcional que se quiere comparar; así como, los límites del sistema y las hipótesis consideradas para cada alternativa. De este modo, la comparación es más concreta, tiene más rigor y es más justificable. Asimismo, destacar la importancia de la buena elaboración del desarrollo del árbol de valores; y, sobre todo, de la elección de los indicadores que acaban siendo aquellos parámetros evaluables y que condicionan el resultado final. Si se analiza y se enfoca bien la elección de los indicadores, ésta puede llegar a ser racional. Los indicadores tendrían que ser aquellos que fueran realmente significativos, relevantes y discriminantes entre las alternativas a comparar.

Además, recalcar que la evaluación de sostenibilidad tiene un gran componente arbitrario: la asignación de los pesos de los requerimientos, las funciones valores, los límites inferiores y superiores son arbitrarios a criterio del evaluador. No obstante, aunque haya una cierta arbitrariedad en la evaluación; ésta es o debería ser transparente y justificada con lo que permitiría que otro evaluador con otro criterio fuera capaz de modificar su evaluación. Además, una manera de reducir esta arbitrariedad en los resultados como evaluador sería realizar un análisis de sensibilidad de la forma más extensa posible; entendiendo que a mayor dominio de variabilidad del análisis de sensibilidad menos arbitrario resultaría ser la solución del problema. Las soluciones de la metodología pueden darse de dos formas distintas: una, realizada de manera que la solución sea única; por ejemplo, en el caso de una licitación de un proyecto; y, otra, una solución de dominio donde en función de unas variables, como pueden ser la asignación de los pesos, una alternativa sería mejor que otra.

9ª. En cuanto al análisis comparado de la evaluación de sostenibilidad de las dos alternativas (barrera mineral natural y barrera mineral artificial) de los sistemas de impermeabilización para el caso concreto del depósito controlado de Orís cabe decir que:

A *nivel económico*, en cuanto a la inversión inicial, la diferencia del precio por m² de la construcción entre la barrera mineral artificial y la mineral es muy significativa. Esto es, por un lado, porque en Orís la localización de arcillas que cumplan con los requisitos de permeabilidad del proyecto se sitúan lejos del depósito; consecuentemente, los costes de transporte del suministro del material aumentan considerablemente. Por otro lado, la diferencia de cota entre la barrera mineral y la artificial es de 80 cm, lo que conlleva a un incremento de excavación mediante

voladuras. Es por esto que, aunque el material Trisoplast sea un material que volumétricamente es mucho más caro que la arcilla, en el caso concreto de Orís, resulta ser la solución con menor inversión inicial.

En cuanto a costes a medio y largo plazo, aunque la realidad de que los datos de mantenimiento no son disponibles, se ha correlacionado el comportamiento de durabilidad de cada capa sellante con los costes de reparación. Como hemos visto, la barrera mineral artificial es mejor en los criterios de durabilidad, más tolerante ante asientos diferenciales por su comportamiento plástico, mayor capacidad de autoreparación y durabilidad.

Una de las desventajas de la solución con la barrera mineral artificial, hoy en día, es la falta de disponibilidad en el mercado. Actualmente, en España, solo hay una empresa que patente la colocación de este material por lo que se puede estar limitado en la ejecución si esta empresa tuviera mucha demanda de obras y; consecuentemente, podría tener el monopolio sobre los precios. Otra de las desventajas de la barrera mineral artificial frente a la barrera mineral natural es que ésta última es un material compuesto básicamente por unas capas de arcillas disponible en muchas zonas de España. No obstante, un impedimento de la barrera mineral natural puede ser que las arcillas suministradas no dieran los requisitos de permeabilidad del proyecto lo que supondría tener que, o bien, incrementar el grosor de arcillas (encareciendo la solución), o bien, disponer de otra lámina de bentonita para incrementar la capacidad sellante del sistema.

A nivel social, se ha determinado que la colocación de la barrera mineral artificial (Trisoplast) es una solución de mayor rendimiento constructivo que la solución con la barrera mineral natural. Entre otros motivos, como se ha comentado anteriormente, la diferencia de espesor entre la barrera mineral natural y la artificial es de 80 cm en un vaso de excavación que se debe realizar mediante voladuras. Por ello es interesante considerar, que una solución en cuanto sea más rápida (dado que al terminar las obras antes de plazo) puede resultar en alguna situación muy satisfactoria desde el punto de vista del cliente. Por ejemplo, en el caso de tener alguna reparación de un depósito por cuestión de fugas de lixiviado, puede resultar ser una solución resolver el problema rápidamente.

El indicador social más desfavorable de la barrera mineral artificial es la falta de conocimiento técnico respecto a la barrera mineral natural; puesto que la barrera mineral artificial es la menos usada en España. Esto conlleva a la incertidumbre por parte de la dirección de la obra; y, consecuentemente, el hecho de no querer asumir un riesgo por emplear un material nuevo respecto al tradicional. Este motivo es la razón por la cual se desestimó la ejecución de la alternativa con barrera mineral artificial en la ampliación del depósito de Orís. Asimismo, en la evaluación de los indicadores sociales, también se ha determinado que el impacto al tráfico de la solución con la barrera mineral natural es mucho más significativo que con la barrera

mineral artificial. Esto es porque la barrera mineral natural requiere 15 veces más material proveniente de camiones bañeras que con la barrera mineral artificial.

A *nivel medioambiental*, por una parte, se ha determinado que la barrera mineral artificial (Trisoplast) de un espesor de 7 cm es tres veces más sellante que la barrera mineral natural con un dimensionado de 90 cm de arcillas compactadas más una lámina de bentonita. Es decir, el flujo anual que traspasaría la capa sellante en el caso de barrera mineral artificial sería tres veces menor que con la barrera mineral natural o tradicional. Por otra parte, se ha realizado un análisis de ciclo de vida para comparar las dos alternativas mediante el programa SIMAPRO utilizando la metodología ReCiPe Endpoint (H) V1.13 / Europe ReCiPe H/. Esta evaluación se ha basado en los indicadores end-points: salud humana, ecosistemas y recursos. La metodología del programa permite obtener una puntuación única para cada alternativa en función de los pesos de los end-points obtenidos. Los resultados del análisis del ciclo de vida han sido que la barrera mineral natural obtiene una puntuación de 7 veces más contaminante que la solución con barrera mineral artificial. Estos resultados son lógicos entendiendo que la diferencia de espesor para garantizar la misma unidad funcional es muy significativa; la barrera mineral natural dispone de un espesor de prácticamente 13 veces superior; y, por lo tanto, necesita de mucho más transporte de material y también necesita mayor incremento de excavación para disponer de la misma cota de acabado.

Para concluir la evaluación de sostenibilidad, cabe mencionar que los resultados son para un caso concreto de estudio; es decir, para la ampliación de la tercera fase del depósito controlado de Orís. Esto no significa que para otros vertederos o depósitos controlados la solución con barrera mineral artificial tenga que ser más sostenible que con la barrera mineral natural. Todo dependerá de las condiciones de contorno y de las circunstancias del caso de estudio; y, por lo tanto, este estudio no pretende ser una evaluación de sostenibilidad genérica entre las capas de impermeabilización de depósitos controlados. Esta reflexión es importante de cara a las evaluaciones de sostenibilidad. Se pueden realizar evaluaciones de sostenibilidad de carácter genérico como ejercicios académicos, pero en casos reales y prácticos carecerían de rigor. Es sumamente importante las condiciones de contorno, los alcances y límites del problema, las hipótesis consideradas, puesto que cuanto más concreto es el problema más real y efectiva es la comparación y evaluación entre las alternativas.

5.4 RECOMENDACIONES

Como recomendaciones para futuras investigaciones se considera conveniente ahondar en las siguientes direcciones:

- Realizar un estudio técnico del material Trisoplast por parte de la Universidad Politécnica de Catalunya con tal de corroborar los datos facilitados por el fabricante de este modo plantear otra alternativa que se podría ejecutar en futuras obras de construcción de depósitos controlados tanto en Cataluña como a nivel nacional.
- Parece conveniente recomendar la incorporación del planteamiento de la evaluación de sostenibilidad, de forma sistemática, como metodología de decisión entre alternativas en las formaciones de Grado de Ingeniería. Se tiene constancia que se explica en algunas temáticas de forma esporádica.
- Muy importante incluir los conocimientos respecto a la construcción de depósitos controlados dentro de la formación del Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos o del Grado de Ingeniería; ya que, los depósitos controlados son infraestructuras que constantemente se realizan ampliaciones, clausuras, nuevas construcciones y por tanto se requiere personal técnico con conocimientos del tema.
- Parece necesario una mayor realización de evaluaciones de sostenibilidad como tomas de decisión de alternativas para futuros proyectos ejecutivos.
- Resulta oportuno desarrollar los conocimientos técnicos de los depósitos controlados biorreactores ya que podrían ser una vía de valorización de los residuos vertidos en los depósitos controlados. Así como, recomiendo la elaboración de evaluaciones de sostenibilidad para valorar si es más sostenible la opción del depósito con biorreactor o tradicional para casos concretos.

ANEJO 1

RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

A1.1 INTRODUCCIÓN

Se ha creído interesante incluir este anejo, con tal de poder disponer de la mayor información posible en relación a la gestión de residuos urbanos en un mismo documento. En este anejo se profundiza acerca de los modelos de segregación y los distintos sistemas de recogida de los residuos sólidos urbanos. Ahora bien, dado que esta temática ya se estudió en profundidad en un apartado del estado de conocimiento del trabajo final de grado: *Estudio comparativo de los modelos de gestión en la recogida de residuos urbanos mediante criterios de sostenibilidad* presentado el 23 de septiembre de 2015 por Aitor Gómez Lejarcegui y dirigido por Antonio Aguado de Cea, no se incorpora en el cuerpo del actual trabajo de fin de master.

La gestión en recogida de los RSU se planifica, por una parte, escogiendo un modelo de segregación que puede ser selectivo o no selectivo; es decir, cómo se separan los RSU en distintas fracciones; y por otra parte, se utiliza uno o varios sistemas de recogida, que consiste en cómo se recogen, tales como el sistema puerta por puerta, contenedores superficiales, contenedores soterrados y neumático como se puede ver en la *figura A1.1*. Los modelos de segregación tanto selectivos como no

selectivos y los distintos sistemas de recogida se estudiarán detenidamente en los próximos apartados.

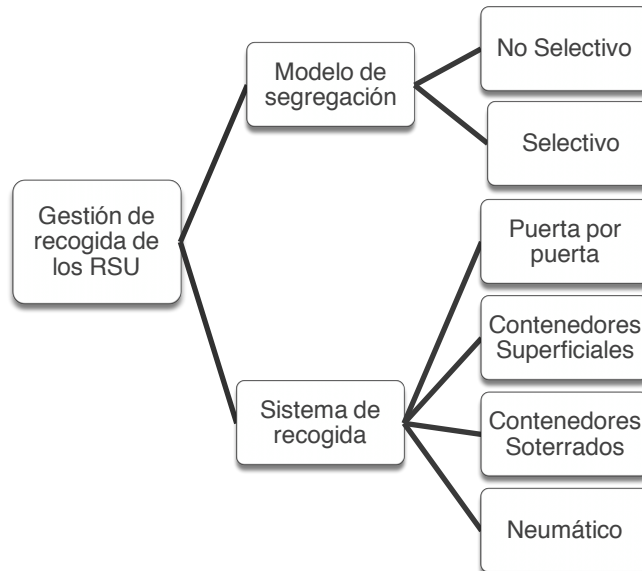


Figura A1.1 Esquema de gestión de recogida de RSU. Fuente: Elaboración propia.

A1.2 MODELOS DE SEGREGACIÓN DE RSU

Los modelos de segregación de RSU que se estudiarán en este trabajo serán por una parte el no selectivo, y por otra parte los modelos selectivos tales como el de 5 Fracciones, Residuo Mínimo, Multiproducto, 4 Fracciones, 3 Fracciones y el 3 Fracciones con sistema de depósito, devolución y retorno (SDDR).

A1.2.1 Recogida no selectiva

La recogida no selectiva consiste en recoger los distintos residuos en una misma fracción. El motivo principal de esta solución es la simplicidad; por una parte, la ciudadanía no tiene que separar los distintos materiales en fracciones ni necesita diferentes contenedores en el hogar o en la vía pública (se gana espacio en la vía pública por la eliminación de áreas de aportación para los contenedores selectivos); y por tanto, tiene una buena aceptación social. Por otra parte, la planificación del sistema de recogida es más sencillo y conlleva normalmente a unos costes menores de recogida de los RSU, requiere menos camiones de recolección de basura y menos viajes al centro de reciclaje, aunque se requiere camiones de mayor capacidad de carga.

Según un informe realizado por el *Centro de Educación de Residuos Sólidos y Peligrosos de la Universidad de Wisconsin (Smart Cities Council)*, el ahorro económico promedio utilizando un sistema de recogida de un solo contenedor es alrededor del 25% respecto a otros sistemas de recogida selectiva en EE.UU. Por el contrario, la recuperación de material reciclable es mucho menor que con un modelo disgregado en diferentes fracciones. También cabe considerar que las instalaciones necesarias y los costes de reciclaje son mayores.

El sistema de un solo contenedor ha ido ganado terreno en los EE.UU durante los años 2005-2015, pasando del 20% de programas de reciclaje con un solo contenedor que se utilizaba en 2005 al 64% que se utiliza actualmente en 2015. Actualmente, el 90% de las grandes ciudades de los EE.UU optan por un modelo de un solo contenedor (no selectivo) como se puede ver en la *figura A1.2*.



Figura A1.2 Contenedor de una sola fracción en EE.UU. Fuente: página web Smart Cities Council (02/06/2015).

Finalmente, podríamos concluir que, con la tecnología de tratamiento y separación de residuos actual, la elección de un modelo de segregación no selectivo se basa en un criterio en el cual el peso más importante de su elección sería el económico y la comodidad del ciudadano; y en cambio, el medio ambiente tendría un peso poco significativo.

A1.2.2 Recogida selectiva

La recogida selectiva consiste en recoger diferentes fracciones de residuos municipales con la finalidad de poder reciclar de la manera más eficiente posible. La recogida selectiva y el reciclaje permiten ahorrar recursos escasos y parte de la energía necesaria para la fabricación de productos a partir de materiales vírgenes.

El aspecto básico de la recogida selectiva es la selección que los ciudadanos y comercios realizan de productores teóricamente recuperables y que posteriormente, la

administración se responsabiliza en gestionar.

A1.2.2.1 Modelos de segregación de RSU selectivos

El ayuntamiento de cada municipio o conjunto de municipios decide el modelo de segregación que utilizará según sus necesidades y/o capacidades. Cada modelo presenta unas ventajas y unos inconvenientes. A continuación, se presentan los distintos modelos de segregación que se estudiarán en este trabajo, se caracterizan por el número de fracciones y la tipología a separar por el usuario:

- **3 Fracciones:** se constituye por las fracciones: vidrio, papel-cartón y restos. Es un modelo de baja segregación. Eso implica como ventaja, una facilidad por parte de la ciudadanía ya que a la población le es fácil separar los residuos de vidrio y papel-cartón, ya que registran valores bajos de impropios, y el sistema logístico de transporte de residuos es más sencillo. Por contra, se debe separar los residuos de la fracción restos (junto con materia orgánica y envases) en plantas de triaje y eso supondría unos gastos de tratamiento mayores.
- **4 Fracciones:** se constituye por las fracciones: vidrio, papel-cartón, envases ligeros y restos (*ver figura A1.3*). A diferencia del modelo de 3 Fracciones, se disgrega los envases ligeros de la fracción restos. Este sistema se ha implantado fuertemente en España, ya que la gestión de recogida de los contenedores (normalmente amarillos en España) de Envases ligeros son competencia de los fabricantes de residuos, y por lo tanto la administración no asume el cargo de los costes de transporte de esta fracción, si no que estos costes de recogida de envases se añaden al precio del producto que paga el consumidor. Por contra, por un lado, este sistema no permite optimizar la reutilización de la materia orgánica en compostaje; y, por otro lado, los envases no depositados en el contenedor amarillo son responsabilidad del municipio; es decir. si el ciudadano no deposita un envase en el contenedor correspondiente el coste de gestión de recogida de ese envase lo asume la administración y en ese caso no se aplicaría la normativa europea de “quien contamina paga”.

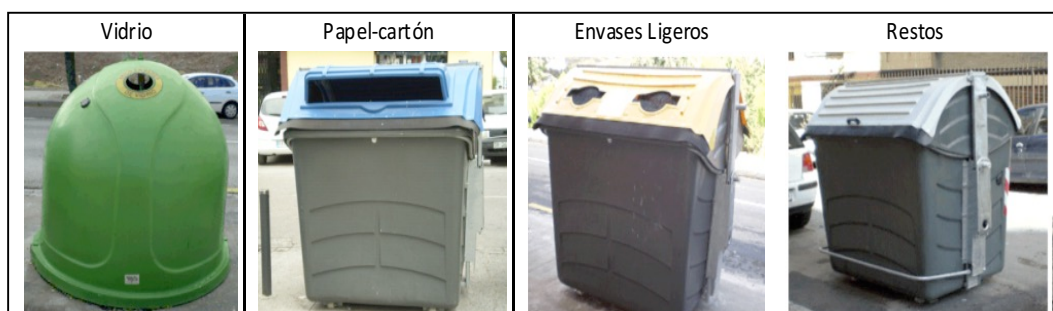


Figura A1.3. Distintas fracciones del modelo 4 Fracciones. Fuente: Ayuntamiento de Granada.

- **5 Fracciones:** se constituye por las fracciones: vidrio, papel-cartón, envases ligeros, materia orgánica y restos (*ver figura A1.4*). Este modelo tiene como

ventaja respecto al 4 *Fracciones*, la separación de la fracción orgánica de la fracción restos. De esta forma, con un buen nivel de concienciación de la ciudadanía permitiría optimizar el reciclaje de materia orgánica en compostaje o valorización energética en digestores anaeróbicos. Por contra, cuanto más se disgrega los residuos, se requiere mayor cantidad de contenedores en la vía pública y esto supone una mayor ocupación de la vía pública y requiere una mayor cantidad de viajes de camiones con lo que los costes de recogida aumentan.



Figura A1.4. Distintas fracciones del modelo 5 Fracciones. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona.

- **Residuo Mínimo:** se constituye por 4 fracciones: vidrio, papel-cartón, materia orgánica y materia inorgánica (ver figura A1.5). A diferencia del modelo 4 *Fracciones*, este modelo te permite disgregar la materia orgánica de los restos, y poderla así utilizarla para compostaje con mayores valores de calidad. A diferencia del modelo de 5 *Fracciones*, al unificar la fracción envases con restos (materia inorgánica), permite disminuir la cantidad de contenedores en la vía pública y los envases se separan en las plantas de tratamiento. Como se ha explicado anteriormente en las *tabla2.3* y *tabla2.4*, el nivel de impropios de la fracción envases y el porcentaje de volumen de envases depositados en la fracción restos de otros modelos como el 5 *Fracción* suele ser elevado. Este modelo permite optimizar los costes tanto de recogida como de tratamiento de la gestión de reciclaje de envases en el caso que la ciudadanía no deposite correctamente los envases en su fracción correspondiente.

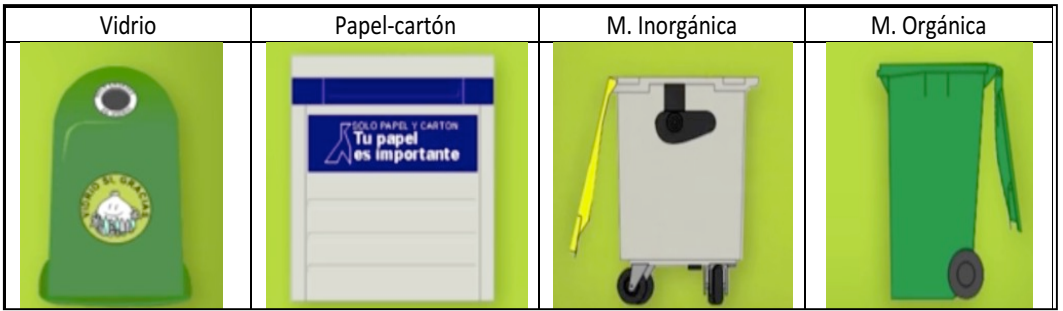


Figura A1.5 Distintas fracciones modelo Residuo Mínimo. Fuente: Ayuntamiento de A Coruña.

- **Multiproducto:** se constituye por 4 fracciones: vidrio, papel-cartón-envases ligeros, materia orgánica y restos (ver figura A1.6). Este modelo a diferencia del

modelo de 5 *Fracciones*, unifica la fracción papel-cartón y envases ligeros, y de esta forma al segregar en una fracción menos, supone menos contenedores y menos espacio público ocupado. Es un modelo que junta una fracción con bajo niveles de impropios (papel-cartón) con otra de niveles altos de impropios (envases ligeros), por lo que es discutible si con este modelo permite optimizar la gestión de envases; todo dependerá del nivel técnico que tengan las instalaciones de las plantas de triaje de envases y papel con este modelo y del sistema logístico que tengan en su diputación o conjunto de diputaciones.

| Vidrio | Papel-cartón-envases | Materia Orgánica | Restos |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |

Figura A1.6. Distintas fracciones del modelo Multiproducto. Fuente: Ayuntamiento de Vic.

- **3 Fracciones + SDDR:** mediante este modelo, el Ayuntamiento es el responsable de la gestión de 3 fracciones (papel-cartón, materia orgánica y restos como se ve en la figura 2.22a), la resta de residuos se gestiona mediante un sistema de depósito, devolución y retorno (SDDR) de los envases donde la responsabilidad de la gestión es del fabricante y del consumidor (figura A1.7).



Figura A1.7 A la Izquierda, las 3 fracciones: negro (restos), marrón (orgánico) y azul (papel-cartón). A la derecha, máquinas de devolución de envases. Fuente: Ayuntamiento de Munich.

Este sistema funciona de la siguiente forma: El consumidor paga una tasa de 0,25e por cada envase. Para proceder a la devolución de la tasa, el consumidor deberá ir a un punto verde o a un supermercado que disponga de unas máquinas especializadas. Al introducir los envases en la máquina como se aprecia en la *figura A1.7*, un sensor identifica el tipo de envase y comprueba que pertenece al sistema de depósito. Si es aceptado, la máquina adquiere el envase, compacta el material en su

interior e imprime un recibo con el reembolso para el cliente.

Este sistema no supone un coste adicional para el consumidor, si no que permite penalizar quien no devuelve el material, es decir *quien contamina paga* y además permite que quien encuentre en la vía pública o en un contenedor no selectivo un envase lo pueda llevar a una máquina y cobrar; es decir, no solo quien contamina pagaría, si no quien recicla el residuo de otro cobraría. Tras años de experiencia con este modelo, se ha demostrado unos resultados excelentes en más de 40 regiones alrededor del mundo: entre el 80-95% de reciclado de envases en los países escandinavos y del 98.5% en Alemania.

Como ventajas, este sistema permite una gran reducción de cantidad de residuos que el Ayuntamiento sería responsable de gestionar con otro modelo, y por tanto es un ahorro muy significativo tanto en la gestión de recogida como en el tratamiento final de residuos. El inconveniente principal es que requiere una inversión inicial para la compra de máquinas especializadas en SDDR por parte de los fabricantes; y, además se necesitan espacios en comercios o supermercados para éstas.

En la tabla A1.1 se presentan las distintas fracciones de los modelos de segregación más utilizados en España; mientras que en la figura A1.8, se muestra un mapa representativo de los modelos de segregación utilizados en las distintas capitales de provincia españolas. Como se puede observar, el modelo más extenso en las capitales de provincia españolas son el modelo 4 Fracciones, seguido del modelo 5 Fracciones en: Cataluña, Mallorca, Menorca, San Sebastián y Vitoria. El modelo Residuo Mínimo solo se utiliza en A Coruña; no hay ninguna capital de provincia con modelo Multiproducto o 3 Fracciones.

| 5 FRACCIONES | RESIDUO MÍNIMO | MULTIPRODUCTO | 4 FRACCIONES | 3 FRACCIONES |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------|---|
| Vidrio | Vidrio | Vidrio | Vidrio | Vidrio |
| Papel-cartón | Papel-cartón | Papel-cartón + Envases ligeros | Papel-cartón | Papel-cartón |
| Envases ligeros | Envases ligeros + Restos | | Envases ligeros | Envases ligeros + Restos + Materia Orgánica |
| Restos | | Restos | | |
| Materia Orgánica | Materia Orgánica | Materia Orgánica | | |

Tabla A1.1 Modelos de segregación de residuos en España. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

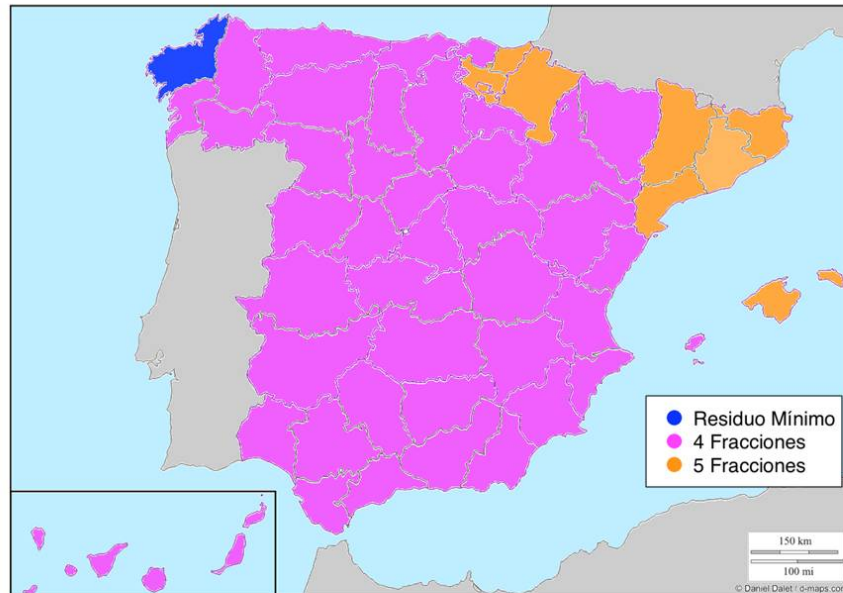


Figura A1.8. Mapa representativo de los distintos modelos de segregación selectiva de las capitales de provincia españolas. Fuente: Elaboración propia.

En la figura A1.8, es interesante observar como el hecho diferencial de las comunidades históricas se reproduce en el sistema de recogida de residuos urbanos. No obstante, cabe matizar que, aunque en la capital de provincia se utilice un modelo de segregación no quiere decir que en toda la provincia se utilice ese modelo. Por ejemplo, en Barcelona se utiliza el modelo de 5 Fracciones, pero dentro de la provincia de Barcelona, Osona utiliza el sistema de Multiproducto y los municipios Castellbisbal, Papiol, Molins de Rei y Torrelles de Llobregat utilizan el modelo de Residuo Mínimo. Es decir, la gestión de recogida de RSU tiene un carácter local que depende de las circunstancias geográficas, económicas y sociales de la población en la que se encuentre.

Finalmente, en la *tabla A1.2*, se presentan de forma resumida las ventajas e inconvenientes de los modelos de segregación selectivo y no selectivo que se han descrito anteriormente.

| MODELOS DE SEGREGACIÓN | VENTAJAS | INCONVENIENTES |
|------------------------|--|---|
| No Selectivo | <ul style="list-style-type: none"> ○ Costes menores de recogida. ▪ Menos espacio ocupado en la vía pública ▪ Comodidad por parte del ciudadano: No requiere disgregar residuos en el hogar. | <ul style="list-style-type: none"> ○ Costes mayores de tratamiento si se quiere mantener mismos niveles de reciclado que con un modelo selectivo. ○ Porcentajes de reciclaje mucho menores. |
| Selectivo | <ul style="list-style-type: none"> ○ Se obtiene mayores porcentajes de reciclado. ○ Costes menores de tratamiento para procesos de reciclado | <ul style="list-style-type: none"> ○ Costes mayores de recogida. ○ Más espacio ocupado en vía pública. ○ Requiere disgregar residuos por parte de la ciudadanía. |

A1.2 Ventajas e inconvenientes de los modelos de segregación selectivos y no selectivos.

A1.3 SISTEMAS DE RECOGIDA DE RESIDUOS URBANOS

Las modalidades de recogida selectiva también se diferencian según el sistema de aportación y recogida de residuos. Se diferencian principalmente por recogida en contenedores en superficie, recogida en contenedores soterrados, recogida puerta por puerta y recogida neumática. Cada sistema presenta una serie de ventajas e inconvenientes que se detallará en los siguientes apartados.

A1.3.1 Sistema de recogida puerta por puerta

La recogida selectiva puerta por puerta consiste en liberar los residuos al servicio municipal de recogida delante de la puerta de casa en unos días y horas concretas determinadas para cada fracción. De esta manera, los residuos solo permanecen unas pocas horas en la vía pública.

Este modelo permite la recogida de todas las fracciones domésticas o solo la recogida de algunas fracciones; como mínimo restos y materia orgánica, manteniendo

los contenedores en aéreas de aportación para la resta de fracciones.

Los resultados de recogida selectiva obtenidos en los municipios con este sistema suelen ser más satisfactorios en cuanto a calidad en la separación de esta forma favorece al tratamiento posterior de triaje en la planta. En consecuencia, los costes de reciclaje disminuyen y se obtienen mayores porcentajes de residuos reciclados y menor cantidad de RSU destinados a vertederos e incineradoras. Por el contrario, el coste de recogida suele ser mayor por el aumento de km recorridos que requiere el sistema, pero permite una generación mayor de empleo que otros sistemas.

Este sistema es óptimo en zonas de baja densidad de población o en barrios con difícil acceso de camiones como son los cascos antiguos de las ciudades. Permite identificar los generadores de los residuos y así poder implementar un sistema de fiscalización más justo como es el pagamiento por generación. Por otra parte, requiere un cambio de hábitos de la ciudadanía (los horarios de entrega son estrictos a unas horas), de manera que se necesita una campaña adecuada de sensibilización.

Este sistema ha sido implantado fuertemente en Guipúzcoa, donde utilizan unos colgadores en un poste que contienen unos códigos que sirven para marcar las viviendas correspondientes, como se puede observar en la *figura A1.9*. De esta forma, se puede penalizar al usuario que no recicla debidamente. Con este modelo de puerta por puerta se puede cumplir de manera más óptima la directriz europea de «quien contamina paga». Por contra, con este sistema es identificable el generador y pone en cuestión la confidencialidad del modo de operar del mismo.



Figura A1.9. Sistema puerta por puerta en Guipúzcoa. Fuente: página web LEZO ongigate iraukorra.

A1.3.2 Sistema de recogida en contenedores superficiales

La recogida selectiva en contenedores superficiales consiste en ubicar estratégicamente en la vía pública los contenedores según su tipología y fracción a

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

recoger. Periódicamente, los contenedores se vacían siguiendo las frecuencias según la generación de cada fracción de residuos.

Generalmente, la fracción orgánica se recoge en contenedores de dos ruedas, mientras que por la resta de recogidas selectivas se utiliza contenedores “iglúes” o contenedores de mayor capacidad. Lo más habitual en España es ubicar los contenedores restos y materia orgánica en áreas de acera; y, por otra parte, los contenedores de vidrio, papel-cartón y envases en áreas de aportación como se ve en la figura 2.25 siguiente.



Figura A1.10. Sistema contenedores superficiales en Barcelona (5 Fracciones). A la izquierda las fracciones restos y materia orgánica (áreas de acera) y a la derecha las fracciones selectivas (áreas de aportación). Fuente: Ayuntamiento de Barcelona.

Este sistema de recogida es el más utilizado tanto en España como en Cataluña. Se ha comprobado empíricamente que cuantos más contenedores por habitante haya, mejores resultados de recogida selectiva hay.

Este sistema tiene como ventajas respecto al sistema puerta por puerta que permite la entrega con mayor flexibilidad de horarios y menores costes de recogida. Por el contrario, este sistema ocupa mucho espacio en la vía pública, produce más contaminación acústica y malos olores, se suelen hacer mal uso (impropios, entregas fuera de horarios, etc.) con la imposibilidad de multar por el anonimato de los residuos.

A1.3.3 Sistema de recogida en contenedores soterrados

El modelo de recogida en contenedores soterrados consiste en colocar los contenedores bajo el nivel del suelo. Desde la superficie solo es visible un buzón por contenedor que será utilizado por los ciudadanos para entregar sus residuos como se ve en la figura A1.11.



Figura A1.11 Buzones RINGO de los contenedores soterrados. Fuente: Formato Verde.

Este sistema, a diferencia de los contenedores superficiales, permite ocultar la basura en superficie con lo que supone una mejor integración en el entorno: menos impacto visual, menos espacio ocupado en la vía pública y, también, gracias a sus diseños de menor altura, mejoran su accesibilidad a personas con discapacidad, mayores y/o niños. Además, este sistema permite almacenar mayores cantidades y permite controlar la cantidad de residuos que contiene los contenedores si se añaden unos dispositivos; así se podría avisar al servicio de recogida y se recogerían los residuos con frecuencias más óptimas. Por contra, este sistema requiere una mayor inversión inicial, sobretudo en entornos urbanos consolidados y los costes de recogida son mayores que los superficiales. Respecto al sistema puerta por puerta, obtienen menores porcentajes de separación y reciclado de residuos y no permite la identificación del generador del residuo. Existen varios sistemas de contenedores soterrados que se diferencian básicamente por la tipología de contenedores utilizados, los buzones y por el sistema de elevación. Los principales tipos de sistemas de elevación son:

- **Sistema con carga lateral (side):** mediante este sistema, inicialmente el operario abre la plataforma superior inclinándola 90 grados, y eleva mediante un sistema hidráulico los contenedores, y mediante carga lateral el camión recoge los contenedores (ver figura A1.12).

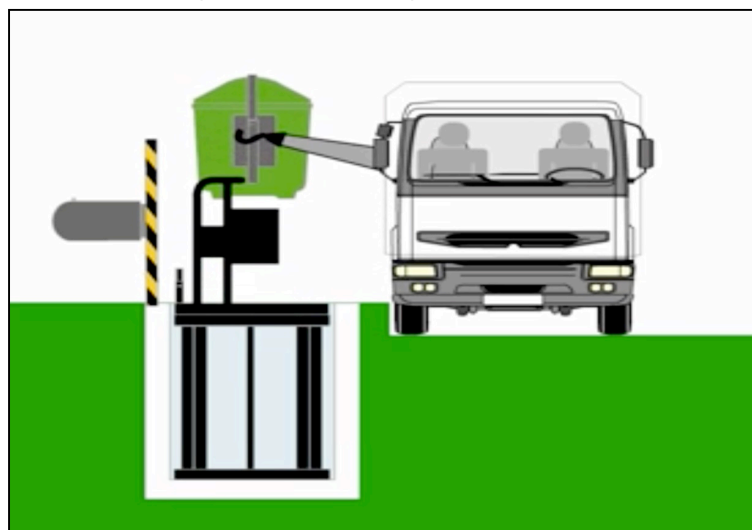


Figura A1.12 Sistema con carga lateral (side). Fuente: Formato Verde.

- **Sistema con carga trasera (back):** con este sistema, el operario eleva la plataforma de forma ascendente gracias a un sistema hidráulico conectado a la red eléctrica mediante una torreta de control ubicado en superficie. Una vez posicionados al nivel de acera, son extraídos rodando como en la recogida superficie hacia el camión de carga trasera. (Ver figura A1.13)

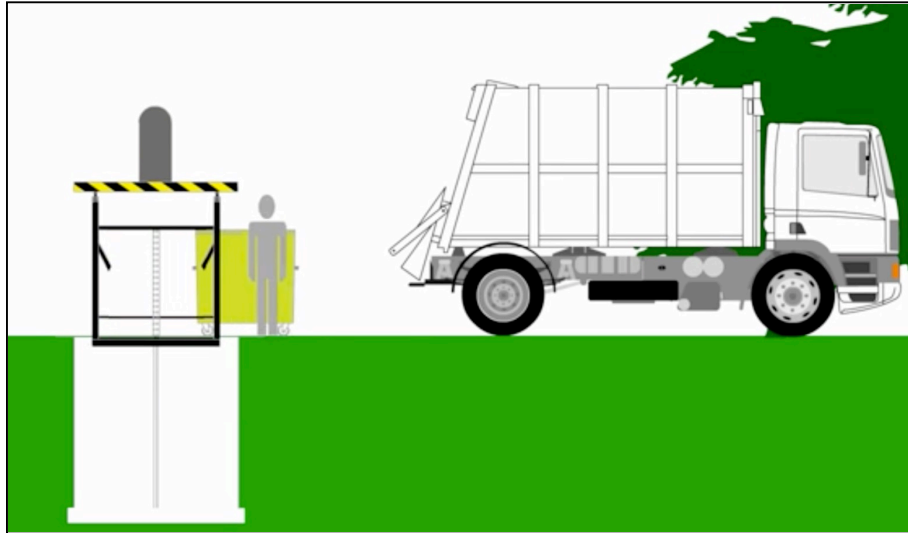


Figura A1.13. Sistema con carga trasera (back). Fuente: Formato Verde.

- **Sistema con carga de pluma (clip):** mediante este sistema, inicialmente el operario abre la plataforma superior inclinándola 90 grados de forma manual o automática; eleva mediante un gancho en la grúa del camión y lo lleva al depósito de almacenaje del propio camión donde vierte los residuos; finalmente, devuelve al contenedor a su posición inicial. (ver figura A1.14)

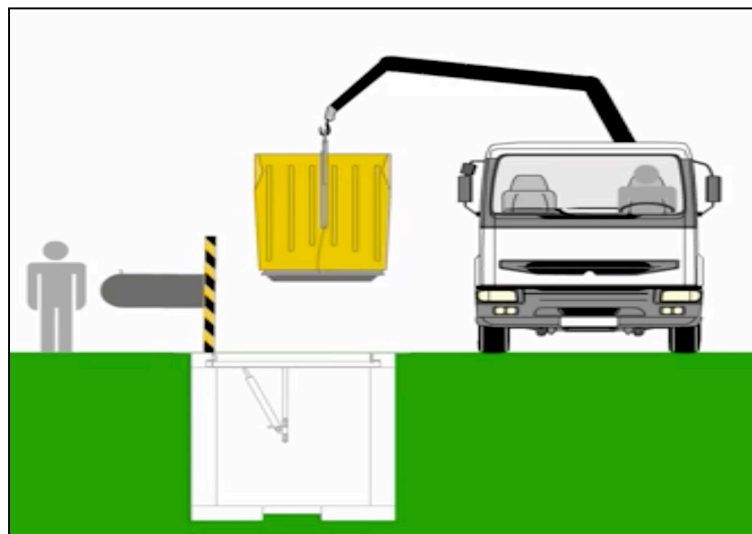


Figura A1.14. Sistema con carga de pluma (clip). Fuente: Formato Verde.

A1.3.4 Sistema de recogida neumática

El sistema de recogida neumática de residuos consiste en disponer de una serie de buzones de abocamiento conectados mediante cañerías subterráneas a un punto de aspiración.

El ciclo de recogida se inicia cuando se entregan selectivamente los residuos en los buzones que se podría encontrar tanto en la vía pública como en el interior de los edificios u hogares. Posteriormente, los residuos bajan por gravedad y/o succión hasta las válvulas que están instaladas a niveles inferiores donde se acumulan los residuos temporalmente. Es fundamental ligar bien las bolsas y que sean de calidad suficiente para evitar roturas de las mismas durante el proceso de succión. Existen dos modalidades de este sistema estático y móvil:

- **Estático:** Mediante este sistema, cada cierto tiempo se procede a vaciar los residuos acumulados gracias a un ordenador que coordina centralizadamente la recogida. En primer lugar, se crea una depresión en la red de cañerías y se introduce el aire propulsor que permite succionar los residuos hasta un punto centralizado. Los residuos son transportados a velocidades entre 60 y 80 km/h aproximadamente y se disponen en unos contenedores. El aire propulsor se filtra para ser luego emitido a la atmósfera y los residuos almacenados en los contenedores se retiran mediante camiones cuando se requiere.

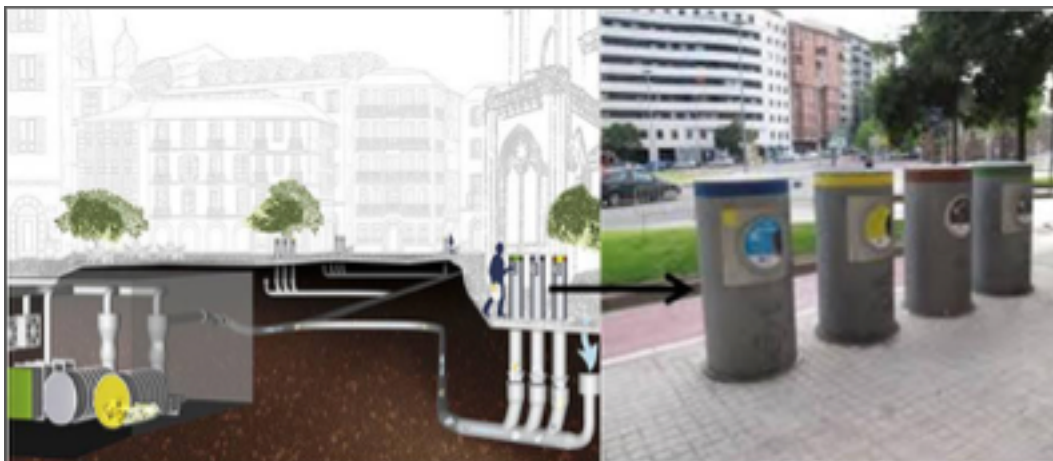


Figura.A1.15 A la izquierda sistema de recogida neumático estático. A la derecha buzones del sistema neumático estático. Fuente: página web Loveoverde.

- **Móvil:** con este modelo, las bajantes verticales están conectados a unos contenedores. La succión se produce por parte de los camiones, desde unos puntos fijos donde se puede llegar a aspirar diferentes contenedores.

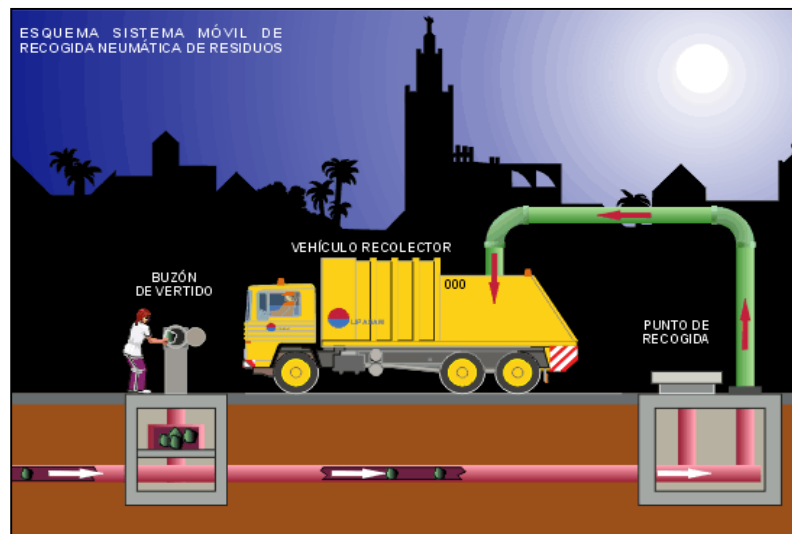


Figura A1.16 Recogida neumática móvil. Fuente: web Miliarium.

Este sistema respecto al sistema de contenedores superficiales permite reducir el espacio público ocupado; reducir los malos olores y los ruidos (en el caso del estático); mejora la accesibilidad a personas con discapacidad e impide que se evoquen residuos voluminosos. Por el contrario, el sistema requiere una inversión inicial muy elevada; sobre todo en zonas urbanas consolidadas con densidad de servicios soterrados. Requieren un consumo elevado de electricidad y los mantenimientos si sufren averías son más caros.

Finalmente, se recogen, en la tabla A1.3, las ventajas e inconvenientes más destacados de los distintos sistemas de recogida de RSU comentados anteriormente.

| SISTEMA DE RECOGIDA | VENTAJAS | INCONVENIENTES |
|--|---|---|
| <i>Puerta por puerta</i> | <ul style="list-style-type: none"> ○ Niveles más altos de reciclaje con costes menores. ○ Reduce el espacio ocupado en la vía. ○ Desaparece el anonimato de los residuos. ○ Mayor generación de empleo. ○ Permite aplicar tasas y multas. | <ul style="list-style-type: none"> ○ Horarios de entrega estrictos. ○ Requiere un cambio de hábitos de la ciudadanía. ○ Se deben guardar las fracciones en casa hasta la hora de recogida. ○ Mayores costes de recogida normalmente. |
| <i>Contenedores superficiales</i> | <ul style="list-style-type: none"> ○ Permite horarios flexibles. ○ Coste de recogida más bajo que otros sistemas. ○ Sistema conocido por los gestores y población. | <ul style="list-style-type: none"> ○ Ocupan mucho espacio de la vía pública. ○ Mayores ruidos y malos olores. ○ Se suele hacer un mal uso (entrega fuera de horarios previstos o fracciones indebidas). |
| <i>Contenedores soterrados</i> | <ul style="list-style-type: none"> ○ Es más estético con el entorno: Menos espacio ocupado en la vía. ○ Permite horarios flexibles en la entrega. ○ Menos malos olores que los superficiales. ○ Mejor accesibilidad a población con dificultades. ○ Permite controlar la cantidad. | <ul style="list-style-type: none"> ○ Coste de inversión elevado, sobretodo en entorno urbano. ○ Niveles menores de recuperación de RSU respecto al Puerta por puerta. ○ Anonimato del vertido de residuos. ○ Sistema menos robusto técnicamente que otros sistemas más simples. |
| <i>Neumática</i> | <ul style="list-style-type: none"> ○ Menos espacio ocupado en la vía. ○ Reducción de ruido y olores. ○ Reducción de transporte rodado (estático) ○ Horarios flexibles. ○ Impide vertido voluminoso. | <ul style="list-style-type: none"> ○ Requiere gran inversión inicial. Difícil de implantar en zonas de urbanismo consolidado. ○ Alto consumo energético. ○ No se puede identificar al usuario culpable de mal uso. ○ Reparaciones y mantenimiento caros. |

Tabla A1.3 Ventajas e inconvenientes de los sistemas de recogida de RSU. Fuente: Elaboración propia.

ANEJO 2

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

A2.1 INTRODUCCIÓN

Se ha creído interesante la elaboración de este anejo, para poder presentar la metodología del análisis de ciclo de vida y obtener un resultado comparativo entre las dos alternativas de capas sellantes de los depósitos controlados. Esta metodología nos permite saber un valor comparativo entre las alternativas para determinar cual tiene un mayor o menor impacto ambiental. De esta forma, esta evaluación nos ha permitido evaluar el indicador de Análisis de ciclo de vida (I_7) dentro del requerimiento medioambiental (R_3) en el capítulo 4.

Respecto al análisis de ciclo de vida, la norma UNE-EN ISO 14040 lo define el como: “una técnica para evaluar los aspectos medioambientales y los potenciales impactos asociados con un producto proceso, o actividad mediante: la recolección de un inventario de las entradas y salidas relevantes de un sistema; la evaluación de los potenciales impactos medioambientales asociados con esas entradas y salidas; y la interpretación de los resultados de las fases de análisis y evaluación de impacto de acuerdo con los objetivos del estudio”. Es una metodología que intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto. No solo se limita al proceso industrial, también incluye todas las etapas de adquisición de la materia prima pasando por los procesos de tratamiento, distribución y uso, hasta el fin de vida. Así como también, tiene en cuenta los impactos ambientales asociados, los efectos sobre la salud, la prevención en la escasez de recursos, los impactos a la sociedad, etc. Esta herramienta permite mejorar la toma de decisiones ante alternativas de proyectos

tanto políticas como de gestión.

A2.2 HERRAMIENTA INFORMÁTICA

La herramienta informática comercial utilizada para evaluar el Análisis del ciclo de vida ha sido el SimaPro 8.0 desarrollada por Pré Consultants que analiza y compara los aspectos medioambientales de un producto de una manera sistemática y consistente siguiendo las recomendaciones de las normas ISO serie 14040. El software ofrece la posibilidad de utilizar bases de datos de ICV creadas, así como bibliográficas (Ecoinvent, BUWAL, IDEMAT, ETH, IVAM). En el caso de bases de datos externas es recomendable realizar el cálculo de un proceso teniendo en consideración únicamente una de ellas que contemple de forma coherente los mismos límites del sistema para materiales y procesos.

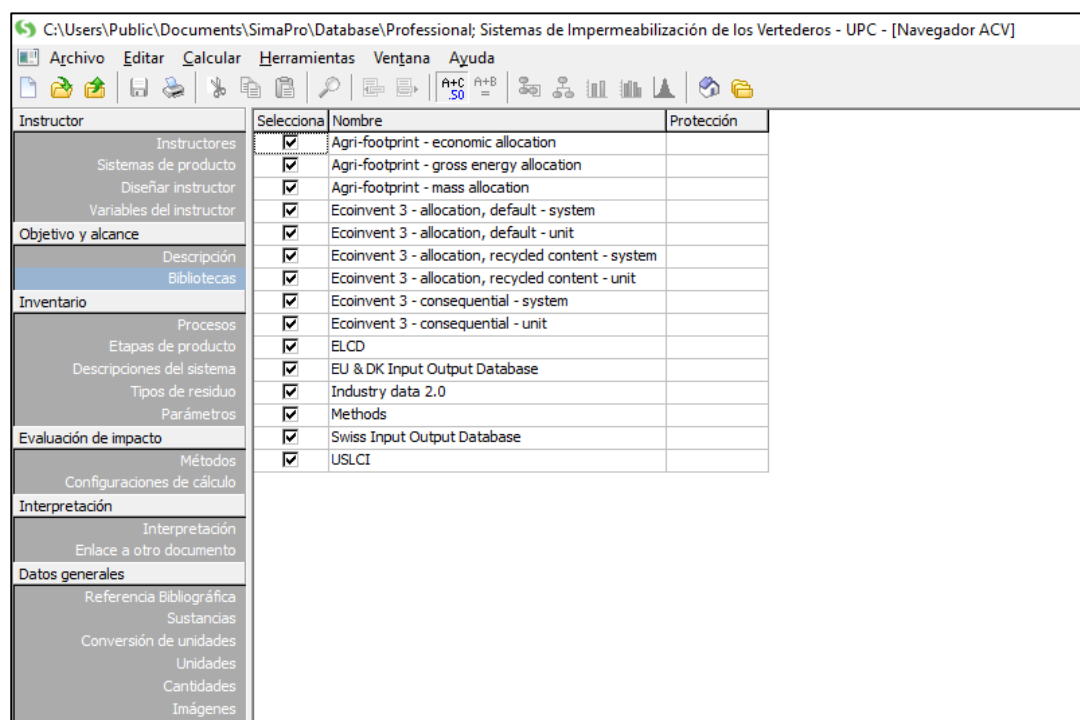


Figura A2.1 Interfaz del software SimaPro 8.0 y bibliotecas integrada. Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña de procesos del inventario se encuentra las partidas para materiales, energía, transporte, transformaciones, uso, escenario de residuo y tratamiento de residuo. No obstante, también resulta aceptable la consideración de los inputs y outputs de este pequeño sistema. Dentro de cada apartado se encuentran las pestañas para definir las bases de datos de ICV; las fases de producto y el sistema; el ciclo de vida y la disposición final; y, el método a emplear en el cálculo para la EICV y

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

datos generales.

Una vez definidas las fases del producto se procede con la introducción del sistema global de ciclo de vida donde se especifica el montaje de las fases de producto; los procesos para ello y los escenarios de residuos y disposición. En la edición del escenario de disposición final es preciso remarcar que la afectación del proceso se limita a las unidades especificadas.

A2.3 UNIDAD FUNCIONAL

Es importante en un análisis de ciclo de vida definir de forma exhaustiva y concreta la unidad funcional con la que se comparará las distintas alternativas. En caso contrario, los resultados carecerían de rigor y fiabilidad puesto que las alternativas deben compararse en un mismo contexto.

La unidad funcional descrita para el análisis de ciclo de vida es un m² de capa en plataforma de impermeabilización de un depósito controlado de residuos no peligrosos localizado en el Vas B de Orís con las siguientes consideraciones:

- Con una durabilidad mínima igual a su tiempo de clausura.
- Para una zona climática mediterránea interior de Cataluña: Temperatura media de 15.0 ° C y precipitación anual de es de 600 mm.
- Cumpla el “Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero” respecto a los vertederos de residuos no peligrosos.
- Se considera que la superficie de terreno donde se apoya la capa de impermeabilización es suficientemente resistente sin generar asientos diferenciales que repercuten a su funcionalidad.

A2.4 ALCANCE Y LÍMITES DEL SISTEMA

El alcance que se ha considerado para la evaluación de los sistemas de impermeabilización ha sido desde la extracción de las materias primas, transporte de los materiales a obra e instalación y colocación. No se ha considerado la etapa de disposición final puesto que la capa impermeabilizante ya se localiza en un vertedero (destinación final de producto).

Para realizar una comparación adecuada entre los dos sistemas de impermeabilización del depósito controlado en el municipio de Orís, se requiere limitar el ámbito de estudio y definir las hipótesis de las alternativas planteadas:

a) Hipótesis para el sistema de impermeabilización convencional (BMN):

- Consideramos que el proveedor de arcilla está ubicado a 100 km de Orís.

- Se considera la arcilla con una densidad de 1.900 kg/m^3 y una impermeabilidad de $5 \times 10^{-10} \text{ m/s}$.
- La empresa proveedora de la superficie de bentonita se considera ubicada a 80 km de distancia de la obra.
- Se considera la manta de bentonita como dos capas de geotextiles de polipropileno más 5 kg/m^2 de bentonita de sodio natural.

b) Hipótesis para el sistema de impermeabilización artificial

- Se considera a la empresa *Terratet Group* como proveedor de Trisoplast compuesto de arena, polímero y bentonita, quien tiene patentado la composición y fabricación del polímero que es transportado desde Alemania a 1500 km de Orís.
- Se considera el proveedor de arena está ubicado a 100 km de la obra en Orís.
- Se considera una empresa proveedora de la bentonita ubicado a 100 km de Orís.

A2.5 INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

Como se ha detallado anteriormente, para el análisis de ciclo de vida se plantearon dos alternativas para la impermeabilización de vertederos. A continuación, se presenta en las tablas A2.1 y A2.2: los datos de inventario; los datos del proceso y materiales para los dos sistemas.

| Extracción | | | |
|-----------------------------|----------|-----------|---|
| Elemento | Cantidad | Unidad | Descripción |
| Arcilla | 1710 | Kg | |
| Manta de bentonita | 6 | Kg | 5kg bentonita/ 1 kg polímero |
| Transporte | | | |
| Medio de Transporte | | Distancia | |
| Camión Bañera 16 a 32 ton | | 100 km | |
| Camión 3.5 a 7.5 ton | | 80 km | |
| Instalación | | | |
| Agua | 180 | Kg | 4 capas |
| Carro de perforación HC-350 | 30.5 | MJ | Consumo energético (Excavación con explosivos) |
| Pala recogedora | | | |
| Compactadora | 157.5 | MJ | 4 capas |

Tabla A2.1 Datos de inventario para la instalación de sistema de barrera mineral natural.

| Extracción | | | |
|---------------------------|----------|-----------|--------------------|
| Elemento | Cantidad | Unidad | Descripción |
| Arena | 114.3 | Kg | |
| bentonita | 14.9 | Kg | |
| Polímero | 0.3 | Kg | Patentado Alemania |
| Transporte | | | |
| Medio de Transporte | | Distancia | |
| Camión Bañera 16 a 32 ton | | 100 km | |
| Camión Bañera 16 a 32 ton | | 100 km | |
| Camión 3.5 a 7.5 ton | | 1500 km | |
| Instalación | | | |
| Agua | 45 | Kg | 1 capa |
| Compactadora | 39.4 | MJ | 1 capa |

Tabla A2.2. Datos de inventario para la instalación de sistema de barrera mineral artificial.

Los datos del inventario del sistema de barrera mineral natural y del sistema de barrera artificial se encuentran referenciados en la base de datos Ecoinvent 3 que proporciona los datos de materiales y procesos incluidos en el ciclo de vida de los sistemas de impermeabilización. Los datos de Ecoinvent 3 de cada alternativa se presentan en las tablas A2.3 y A2.4.

| Material o Proceso | Material o proceso de BBDD Ecoinvent 3 |
|---|---|
| Arcilla | Clay {CH} clay pit operation Alloc Def, U |
| Manta de bentonita (geotextil polímero + bentonita) | Bentonite {DE} quarry operation Alloc Def, U |
| | Polypropylene, granulate {RER} production Alloc Def, U |
| Transporte de arcilla | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U |
| Transporte de manta de bentonita | Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 Alloc Def, U |
| Agua | Tap water {CA-QC} tap water production, underground water without treatment Alloc Def, U |
| Excavación con explosión | Diesel, burned in building machine {GLO} processing Alloc Def, U |
| Compactadora | Diesel, burned in building machine {GLO} processing Alloc Def, U |

Tabla A2.3. Procesos y materiales – Datos Ecoinvent 3 para sistemas de barrera mineral natural.

| Material o Proceso | Material o proceso de BBDD Ecoinvent 3 |
|--------------------|--|
|--------------------|--|

| | |
|----------------------|--|
| Arena | <i>Sand {CH} gravel and quarry operation Alloc Def, U</i> |
| Bentonita | <i>Bentonite {DE} quarry operation Alloc Def, U</i> |
| Polímero | <i>Polypropylene, granulate {RER} production Alloc Def, U</i> |
| Transporte de arena | <i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U</i> |
| Transporte bentonita | <i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Alloc Def, U</i> |
| Transporte polímero | <i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 Alloc Def, U</i> |
| Agua | <i>Tap water {CA-QC} tap water production, underground water without treatment Alloc Def, U</i> |
| Compactadora | <i>Diesel, burned in building machine {GLO} processing Alloc Def, U</i> |

Tabla A2.4. Procesos y materiales – Datos Ecoinvent 3 para sistemas de barrera mineral artificial.

A2.6 EVALUACIÓN DEL IMPACTO

La evaluación del impacto ambiental de los sistemas de impermeabilización se realiza con la interrelación de los datos del inventario de ciclo de vida en las categorías de impacto y los indicadores de estas categorías; de esta manera se obtienen valores que facilitan su interpretación. Para el presente estudio se consideró las categorías de impacto midpoint incluidas en el Método de evaluación CML-IA baseline V3.04 / EU25, en la tabla A2.5 se detalla las categorías de evaluación y sus respectivas unidades.

| Categoría de Impacto | Unidades |
|----------------------------------|---------------------|
| Abiotic depletion | <i>Kg Sb eq</i> |
| Abiotic depletion (fossil fuels) | <i>MJ</i> |
| Global warming (GWP100a) | <i>Kg CO2 eq</i> |
| Ozone layer depletion (ODP) | <i>Kg CFC-11 eq</i> |
| Human toxicity | <i>Kg 1.4-DB eq</i> |
| Fresh water aquatic ecotox | <i>Kg 1.4-DB eq</i> |
| Marine aquatic ecotoxicity | <i>Kg 1.4-DB eq</i> |
| Terrestrial ecotoxicity | <i>Kg 1.4-DB eq</i> |
| Photochemical oxidation | <i>Kg C2H4 eq</i> |
| Acidification | <i>Kg SO2 eq</i> |
| Eutrophication | <i>Kg PO4 ---eq</i> |

Tabla A2.5. Categorías y unidades de evaluación.

A2.7 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Se utilizó el programa SimaPro para determinar el impacto ambiental generado por el sistema de barrera mineral natural y el sistema de barrera artificial. En las tablas y figuras, se presentan los resultados obtenidos considerando las categorías midpoints con el método de evaluación CML-LA Baseline V2.02 EU25.

En la figura A2.2, se presenta el porcentaje de impacto de cada indicador midpoint para cada alternativa respecto al impacto total de ese indicador.

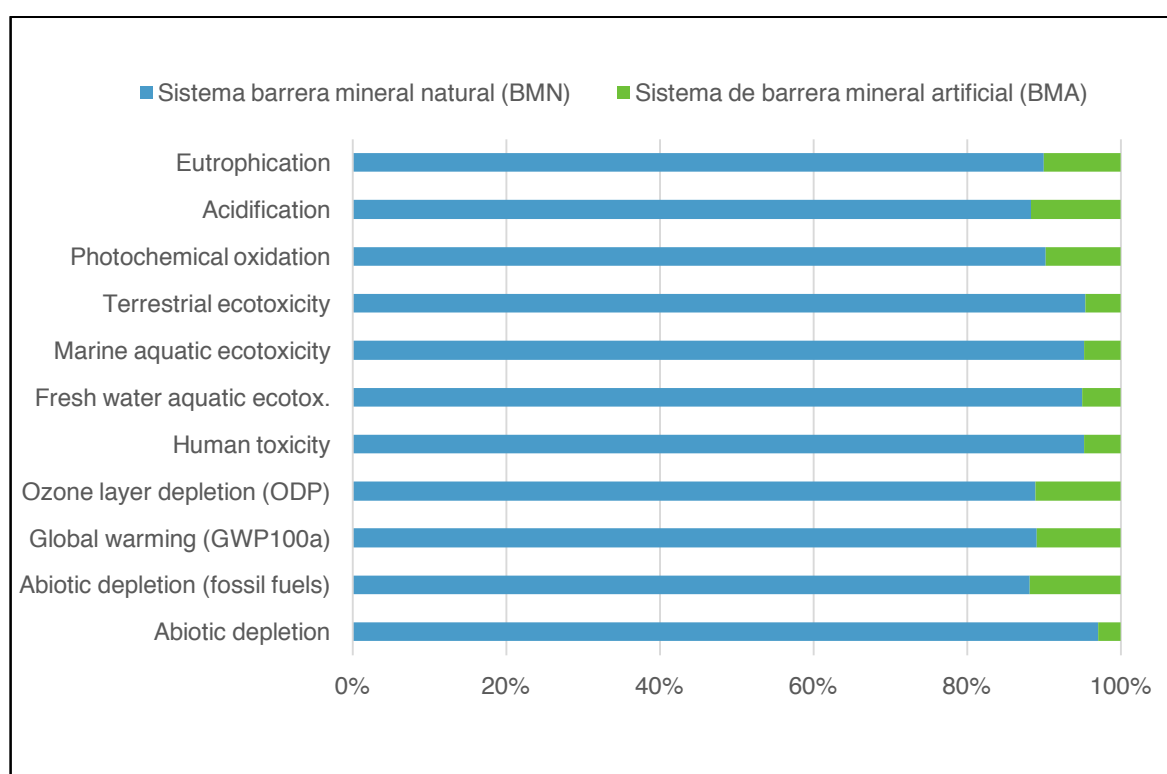


Figura A2.2. Comparación del ACV de los sistemas de barrera para vertederos por categorías de impacto.

Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar en la figura A2.2 donde se comparan las categorías de impacto mid-point de los dos sistemas: el sistema con barrera mineral natural (BMN) es la que presenta un mayor impacto en las once categorías mid-point en comparación con el sistema de barrera mineral artificial (BMA).

En la tabla A2.6 y figura A2.3 se muestran los resultados de la cuantificación de las categorías del impacto mid-point para las dos alternativas.

| Categoría de impacto | Unidad | Sistema de barrera mineral natural (BMN) | Sistema de barrera mineral artificial (BMA) |
|----------------------------------|--------------|--|---|
| Abiotic depletion | kg Sb eq | 0,0004 | 1,3256E-05 |
| Abiotic depletion (fossil fuels) | MJ | 965,7218 | 129,8292 |
| Global warming (GWP100a) | kg CO2 eq | 62,0789 | 7,6371 |
| Ozone layer depletion (ODP) | kg CFC-11 eq | 1,04E-05 | 1,30E-06 |
| Human toxicity | kg 1,4-DB eq | 33,0224 | 1,6445 |
| Fresh water aquatic ecotox. | kg 1,4-DB eq | 13,1312 | 0,6930 |
| Marine aquatic ecotoxicity | kg 1,4-DB eq | 40827,655 | 2058,0428 |
| Terrestrial ecotoxicity | kg 1,4-DB eq | 0,1506 | 0,0072 |
| Photochemical oxidation | kg C2H4 eq | 0,0134 | 0,0014 |
| Acidification | kg SO2 eq | 0,3187 | 0,0423 |
| Eutrophication | kg PO4--- eq | 0,08626 | 0,0095 |

Tabla A2.6. Valores del ACV de los sistemas de barrera para vertederos por categorías de impacto.

En la figura siguiente, se presenta los resultados del análisis de impacto por normalización:

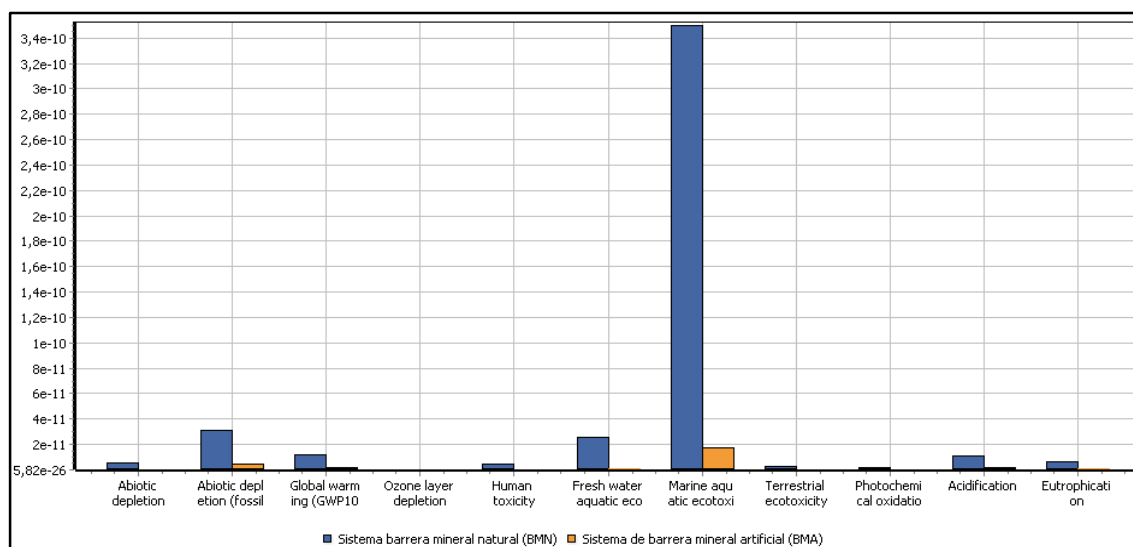


Figura A2.3. Comparación del ACV de los sistemas de barrera mineral por categorías de impacto por normalización. Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar en la figura A2.3, la categoría de mayor impacto significativo en ambos sistemas es la Ecotoxicidad acuática marina; y, en segundo lugar, el agotamiento abiótico por combustibles fósiles; adquiriendo una mayor importancia en el sistema barrera mineral natural (BMN) en comparación con las 9 categorías restantes.

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

Para poder realizar una adecuada interpretación de los resultados previamente presentados, se analiza el impacto de cada material o proceso de los dos sistemas para cada categoría en las figuras A2.4 y A2.5.

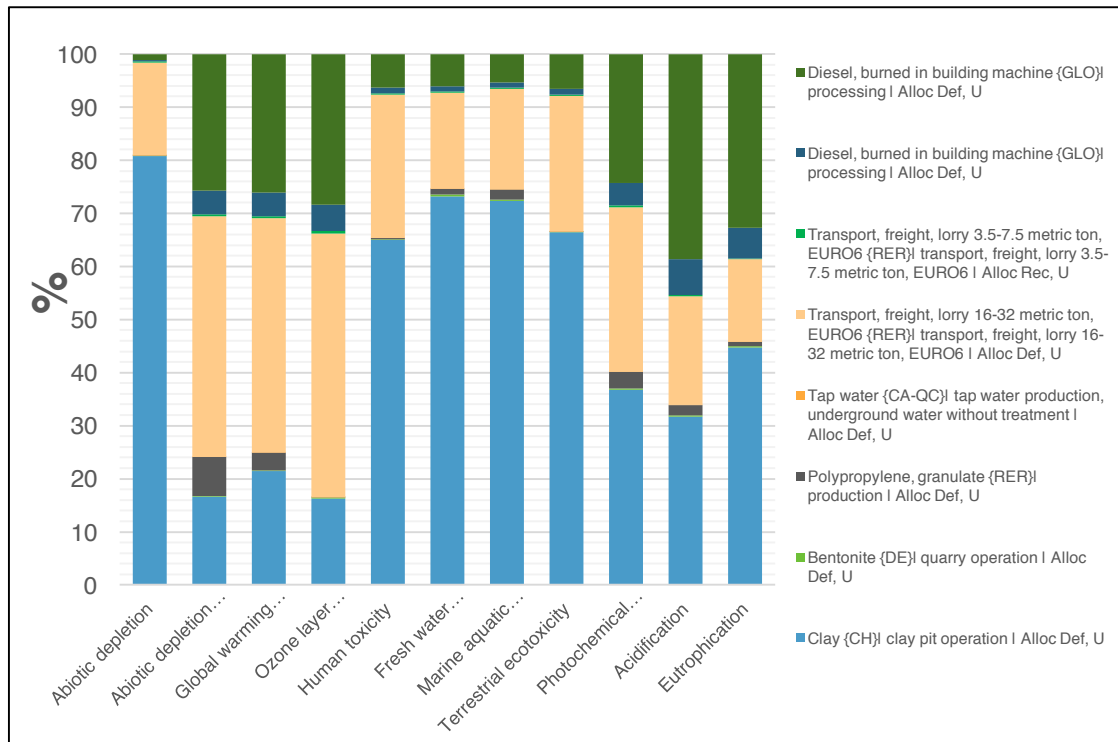


Figura A2.4. Impacto de cada material o proceso del sistema (BMN) para cada categoría de impacto.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los resultados con el sistema de barrera mineral natural (figura 8), observamos que la extracción de la arcilla representa el material de mayor impacto seguido del transporte de este material; y el consumo energético de diésel de la máquina compactadora.

En primer lugar, si analizamos la categoría que supone un mayor impacto, la Ecotoxicidad acuática marina, observamos que la extracción de arcilla representa un 72.35%, que el transporte un 18.92% y que el consumo de diésel de la máquina compactadora un 5.37%.

En segundo lugar, para el agotamiento abiótico por combustibles fósiles, comprobamos que de un total de 965,72 MJ, el transporte representa un 45.32 %, que el consumo de diésel de la máquina compactadora un 25.7 %; y que la extracción de arcilla 16.57 %.

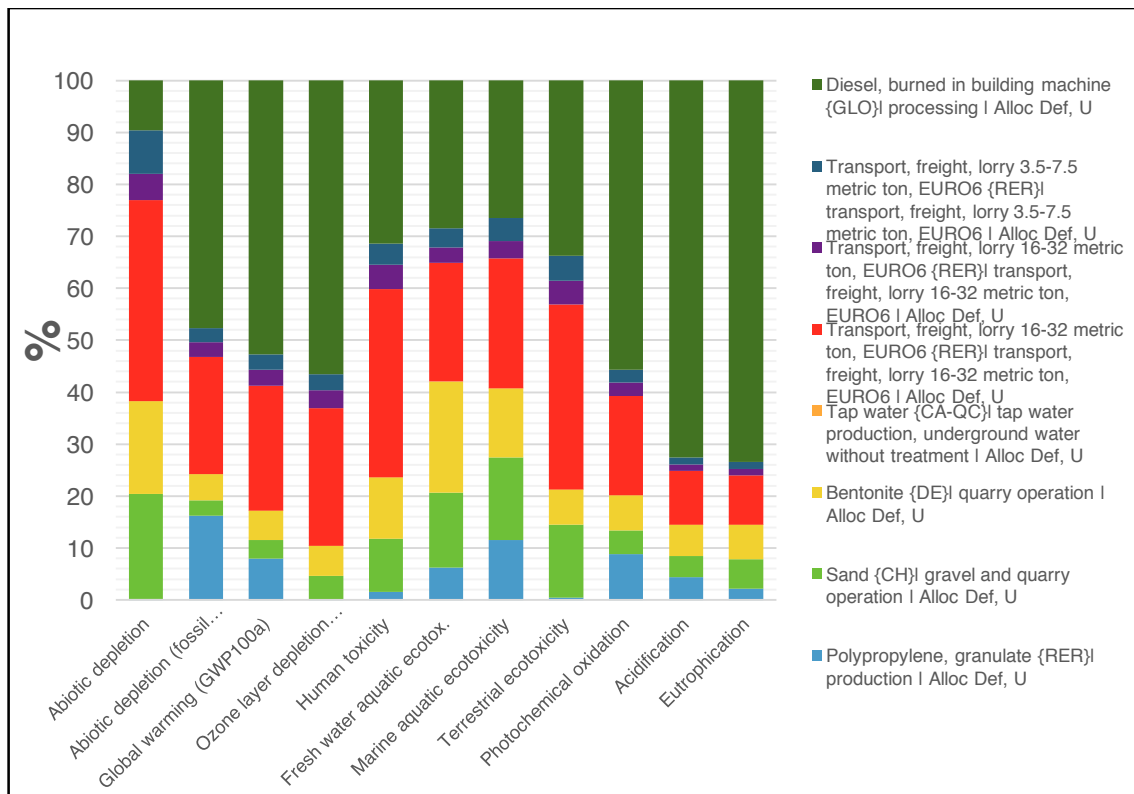


Figura A2.5. Impacto de cada material o proceso del sistema (BMA) para cada categoría de impacto.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a los resultados con el sistema de barrera mineral artificial (figura A2.6), a nivel general, observamos que el material o proceso de mayor impacto es el proceso de compactación (consumo de diésel); seguido del transporte de la arena y la extracción de los materiales.

Si analizamos la categoría que supone un mayor impacto, la Ecotoxicidad acuática marina, observamos que la compactación representa un 26.5%, que el transporte un 25.10% y que la extracción de la arena un 15.88%.

Además, para el agotamiento abiótico por combustibles fósiles, comprobamos que, del total, la compactación representa un 47.62%, el transporte de la arena un 22.54 %; y la fabricación del polímero un 16.26%.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LEGISLACIÓN

España. Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y suelos contaminados. A: *Boletín Oficial del Estado*. Madrid: BOE, 2011, nº 181, p. 85650.

España. Real Decreto 481/2001, de 27 de diciembre, *Por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*, transponiendo la Directiva 1999/31/CEE del Consejo, de 26 de abril. Por lo tanto, este Real Decreto incrementa la Normativa de Residuos Urbanos. Ministerio de Medio Ambiente «BOE» núm. 25, de 29 de enero de 2002 Referencia: BOE-A-2002-1697 Texto consolidado Última modificación: 23 de abril de 2013.

España. Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. A: *Boletín Oficial del Estado*. Madrid: BOE, 1998, núm. 95, p. 13372.

Cataluña. Decret 152/2017, de 17 de octubre, *Sobre la clasificación, la codificación y las vías de gestión de los residuos en Cataluña*. A: *DOGC*, Barcelona: de 19 de octubre de 2017, núm. 7477

Cataluña. Decret 1/2009, de 21 de julio, *Por el que se aprueba el Texto refundido de la Ley reguladora de los residuos, Departamento de la Presidencia*. Publicado en y BOE núm. 262 de 30 de octubre de 2009. Capítulo II- Acción de la Generalitat. (Artículos del 6 al 18). A: *DOGC*, de 28 de Julio de 2009, núm. 5430

Cataluña. Decret 69/2009, de 28 d'abril, *Pel qual s'estableixen els criteris i els procediments d'admissió de residus en els dipòsits controlats*. A: *DOGC*, Barcelona, de 30 d' abril del 2009, núm. 5370.

Cataluña. Decret 1/1997, de 7 de enero, sobre la disposició del rebuig dels residus en dipòsits controlats. A: DOGC, Barcelona, 13 de enero del 1997, nº 2307. [Disponible

en: http://residus.gencat.cat/web/.content/home/consultes_i_tramits/normativa/normativa_catalana_en_materia_de_residus/decret_1_1997.pdf]

Europa. D.O.U.E (2008) Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008. *Sobre los residuos y por lo que se derogan determinadas Directivas Diario Oficial de la Unión Europea* L.312 página 312/3. [Disponible en: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=celex:32008L0098>>]

Europa. Decisión 2003/33/CE del Consejo Europeo, de 19 de diciembre de 2002, *Por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE*. Diario Oficial No L 11/27 de 16/01/ 2003. [Disponible en: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:011:0027:0049:ES:PDF>>]

Europa. Directiva Europea 1999/31/CE del Consejo Europeo, de 26 de abril de 1999, *Relativa al vertido de residuos*. Diario Oficial No L 182 de 16/07/1999. [Disponible en: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex:31999L0031>>]

PUBLICACIONES:

Alcaide, A., 2012. *Residuos sólidos urbanos: Una consecuencia de la vida*. Editorial, Universidad Jaume I.

Josa, A.; Alavedra, P. Capítulo 3: *El concepto de sostenibilidad, A: La medida de la sostenibilidad en edificación industrial: Modelo Integrado de Valor de Edificios Sostenibles (MIVES)*. Labein tecnalia; universidad del País Vasco, Universitat Politècnica de Catalunya.

André, F; Cerdá, E., 2006. *Gestión de residuos sólidos urbanos: análisis económico y políticas públicas*. Cuad. Econ. ICE No 71: 71-92.

ARC. Pla d'acció per a la gestió de residus municipals a Catalunya (2005-2012). 2005.

ARC. Pla territorial sectorial d'infraestructures de gestió de residus municipals de Catalunya. 2005.

ARC. Propostes de base per a la formulació d'un nou programa horitzó 2007-2012. Revisió del Programa de gestió de residus municipals de Catalunya (PROGREMIC 2001-2006). 2006 Disponible en: <http://www.arc.cat>, Agència de residus de Catalunya.

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

- Cañabate, A., 1997. *Toma de decisiones. Análisis y entorno organizativo*. Editorial, UPC. Universitat Politècnica de Catalunya
- Carreras, N., 1992. *Tratamiento de los residuos sólidos urbanos mediante vertedero controlado*. Gestión de Residuos Sólidos Urbanos.
- Chacón, A., 1996. *Conferencia sobre Caracterización del terreno para la ubicación de vertederos: Condicionantes hidrogeológicos y geotécnicos*. Colegio de Ingenieros de Guatemala.
- Grupo EP, ed. 1999. *Guía de Vertederos*, Madrid: Federación Española de Municipios y Provincias.
- López, JV., 2015. *Valorización energética de Residuos Urbanos: Material didáctico. Máster en gestión sostenible de los residuos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- López, J.; Pereira, J.; Rodríguez, R.; 1980. *Eliminación de los residuos sólidos urbanos*. Barcelona: Editores técnicos Asociados, S.A.
- Muruals, J.; Maíllo, A. 2010. *La incineración de los residuos sólidos urbanos: Aporte energético y ambiental*. Madrid. *Guía de valorización energética de los residuos*. Madrid: Gráficas Arias Montaña, S. A.. P. 49-88.
- Diagnóstico del sector Residuos en España*. 2014. Publicaciones de la SGAPC, Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: Análisis y Prospectiva. Serie Medio ambiente, “, Revista, nº 7, abril 2014.
- Romero, C., 1992. *Teoría de la decisión multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones*. Editorial, Alianza.
- S.H. Lieten MSc, 2018. *Landfill Management in the Netherlands* (Final version). Deventer (107801/18-006.894)
- Seoáñez, M., y otros. 1999. *Residuos. Problemática, descripción, manejo, aprovechamiento y destrucción: Manual para políticos, técnicos y enseñantes y estudiosos de la Ingeniería del Medio Ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa.Madrid. Colección Ingeniería del Medio Ambiente. ISBN: 84-7114-855-2
- Svensson, N; Eklund, M; Frändegard, P; Krook, J; 2010. *Introducing and approach to assess environmental pressures from integrated remediation and landfill mining. Knowledge collaboration & learning for sustainable innovation*. ERSCP-EMSU Conference. Delft, Holanda.

E-TESIS

Carreras, N., 2017. *Producción y Recuperación de Biogás de Vertederos* (Máster en Gestión y Residuos. UAM. [Consulta: 11 de enero del 2018] Disponible en: <https://formacion.uam.es/.../N_Carreras_Prod%20y%20Recup%20Biogás%20de%20Vert>.

Gómez Lejarcegui, Aitor, 2015, Barcelona. Treball Final de Grau: *Estudio comparativo de los modelos de gestión en la recogida de residuos urbanos mediante criterios de sostenibilidad*, UPC.

Ronquillo Muñoz, Laura (2015). *La gestión de los residuos sólidos urbanos en Cataluña. Relación territorial de los vertederos controlados*. (Proyecto final de Máster Universitario de Arquitectura, Energía y Medio Ambiente). Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona. [Consulta: 11 de enero del 2018] Disponible en:<https://www.aie.upc.edu/maema/wpcontent/uploads/2016/.../RONQUILLO_Laura.pdf>.

PÁGINAS WEB

A Report on the Implementation of Directive 1999/31/EC on the Landfill of Waste, may 2009, Institute for European Environmental Policy [Consulta: 11 de enero del 2018]. [Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/archives/waste/reporting/pdf/Landfil_Directive.pdf>]

PRECAT20: Programa General de prevención y gestión de residuos y recursos de Catalunya 2013-2020. 140 páginas, [Consulta 11 de enero del 2018] [Disponible en: <<http://residus.gencat.cat>>]

PINFRECTA20: Plan territorial sectorial de infraestructuras de gestión de residuos municipales de Cataluña 2013-2020, 46 páginas, [Consulta 13 de enero del 2018] [Disponible en: < <http://residus.gencat.cat>>]

Área de Acción Territorial y Desarrollo Sostenible del Potencial de Reducción de Emisiones en los vertederos municipales. 2011. [en línea] Madrid. FEMP - Federación Española de Municipios y Provincias. [146 pantallas] [Consulta: 13 de enero del 2018] [Disponible en: <<http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/resreduccion>>]

Baldasano, J.M. 2001. *La incineración de residuos: ¿es una alternativa?*, Revista: medi ambient, Tecnologia i Cultura. Núm. 29 - juliol 2001 [Consulta: 20 de enero del 2018] [Disponible en: <<http://www.gencat.cat/mediamb/revista/rev29-4-c.htm>>]. ISSN: 1130-4022

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

Características y beneficios del uso del compost, Agència de Residuos de Catalunya, [Consulta a: 21 de enero del 2018] [Disponible en: <http://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/recollida_selectiva/residus_municipals/materiaorganica_form_fv/el_compost/caracteristiques_i_beneficis_de_lus_del_compost/>]

Catàleg de Residus de Catalunya, Gener 2018, Guia sobre la codificació, la classificació i les vies de gestió dels residus a Catalunya. Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat. ARC. [Consulta: 21 de enero del 2018] [Disponible en: <<http://residus.gencat.cat/es/actualitat/noticies/detall/Entra-en-vigor-del-Decreto-152-2017-sobre-la-clasificacion-la-codificacion-y-las-vias-de-gestion-de-los-residuos-en-Cataluna>>]

Cespa [Consulta: 17 de marzo] [Disponible en: <www.cespa.es>]

Consorci de Residus i Energia de Menorca: [Consulta: 24 de febrero] [Disponible en: <http://www.cremenorca.org>]

Datosmacro. [Consulta: 24 de febrero] [Disponible en: <<http://www.datosmacro.com/>>]

Depósitos controlados, Càtedra de Desenvolupament Sostenible, DOW/ URV © 2018 Mòduls URV [en línia] [Consulta a: 31 de marzo] [Disponible en: <<http://desenvolupamentsostenible.org/es/generacion-y-gestion-de-residuos-un-compromiso-con-la-sostenibilidad/3-la-gestion-de-los-residuos-municipales/36-ventajas-e-inconvenientes-de-la-deposicion-controlada-y-de-la-incineracion-de-los-residuos/361-los-vertederos-controlados>>]

Documentos de la AEMA relativos a la planificación del próximo periodo 2014-2018. Red EIONET – Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) Gobierno de España, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio ambiente. [Consulta: 31 de marzo] [Disponible en: <<http://www.mapama.gob.es/...ambiental/.../agencia-europea-medio-ambiente...ambiental/eio>>]

El compostaje, la mejor alternativa a la incineración, *Vivalebio magazine*, [Consulta: 31 de marzo] [Disponible en: <<https://www.vivalebio.com/ca/planeta/271-el-compostaje-la-mejor-alternativa-a-la-incineracion.html>>]

European Environment Agency. [Consulta: 17 de febrero del 2018] [Disponible en: <http://www.eea.europa.eu>]

Eurostat. [Consulta: 24 de febrero] [Disponible en: <http://www.eurostat>]

Gestión de residuos urbanos: El estado del medio ambiente y evolución, Capítulo V [en línia], [Consulta: 31 de marzo del 2018]. [Disponible en: <<http://www.mapama.gob.es/es/estadística>>]

Gestión integral de residuos, CEMPRE, Uruguay. [Consulta a: 31 de marzo del 2018].
Disponible en: <http://www.cempre.org.uy/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=98>

Gestión Integral de Residuos Sólidos, SA: [Consulta: 31 de marzo del 2018]
[Disponible en: <<http://www.girsa.es>>]

Guía Técnica de la Gestión de Residuos Municipales, 2ª edición. 2015. Universidad Politécnica de Madrid, la Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP) y ECOEMBES, ISBN: 978-84-96442-65-8. Capítulo Eliminación y Vertederos, p. 515-537 [Consulta: 31 de marzo del 2018] [Disponible en:<http://ayto-fuenlabrada.es/recursos/doc/SC/Medio_ambiente/47309_2652652016141950.pdf>]

Informe de contenido general Red EIONET – Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) Gobierno de España, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio ambiente [Consulta: 31 de marzo del 2018] [Disponible en: <<http://mapama.gob.es>>]

Informe sobre Sostenibilidad en España 2017: Cambio de rumbo, tiempo de acción.

Ana Belén Sánchez (coord.). Edita: Fundación Alternativas y Ecoembes. 2017

ISBN: 978-84-15860-69-3. [Consulta: 31 de marzo de 2018] [Disponible en: <www.mapama.gob.es/es/ceneam/recursos/.../informe-sostenibilidad-espana2017.asp>]

Informe Sostenibilidad en España 2008 - UPV, [Consulta: 31 de marzo de 2018]
[Disponible en: <www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0637074.pdf>]

Informe Anual 2007, Agència de Residus de Catalunya y Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge. [Consulta a: 31 de marzo del 2018]
[Disponible en: <http://www.residus.gencat.cat/web/.content/home/lagencia/publicacions/.../memoria07_esp.pdf>]

Manejo de Residuos en los Países Bajos, Breve descripción, Normativa Holandesa, específicamente con la “Circular sobre valores de referencia y valores de intervención para la recuperación del suelo y sus anexos A-D; Ministerio de Vivienda, Planificación del Territorio y Medio Ambiente Holandés” Dirección General de Protección Medioambiental, Departamento de Protección del Suelo; (Netherlands Government Gazette, No39- 04 de febrero de 2000)

Martínez Vallejo, Silvia. *Implantación de un Sistema de Gestión de Calidad y Medio Ambiente en un depósito controlado de residuos no peligrosos de Cataluña* [en línea]. Trabajo final de carrera, 2011. Universitat Politècnica de Catalunya [Consulta: 7 de abril del 2018]. [Disponible a:

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

<<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/14853>>]

Memòria de l'Agència de Residus de Catalunya 2016. Capítulo 3. La planificació dels residus 28, Capítulos: 3.1 Programa general de prevenció i gestió de residus i recursos de Catalunya 2020 (PRECAT20); y 3.2 Pla Territorial Sectorial d'Infraestructures de Residus Municipals (PINFRECAT20). Capítulo 7. La valorització i el tractament de residus. [Consulta: 17 de marzo] [Disponible en: <http://residus.gencat.cat/web/.content/home/lagencia/publicacions/publicacions_generals/Informe_anual_ARC_2016/memoria_arc_2016_ONLINE.pdf>]

Moreno Sánchez, Javier, *Vertederos de última generación*, febrero 2009, páginas 71-76 [Consulta a: 7 de abril del 2018] [Disponible en: www.asociacionversos.org/.../VERSOS08_JAVIER-MORENO-RESUMEN-VERTEDE]

Pablo Rodríguez, Universidad de Deusto, *Valorización energética de los residuos: ventajas y desventajas*. por CREII el 19/12/2016. [Consulta a: 28 de enero del 2018]. [Disponible en: <<http://creii.es/valorizacion-energetica-los-residuos-ventajas-desventajas>>]

Pueyo Jiménez, Carmen. *Mejora del sistema de desgasificación y valoración energética del biogás del vertedero de "La Vall d'en Joan" [en línia]*. 2004, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Departament de Màquines i Motors. Editor: UPC. [Consulta: 23 de marzo del 2018]. [Disponible en: <<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3689>>]

Residuos municipales generados por persona a la UE. Eurostat. 30 de enero de 2017. [Consulta: 18 de febrero del 2018] [Disponible en: <<http://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/DDN-20170130-1>>]

Resúmenes estadísticos de instalaciones de gestión de residuos 2017. [Consulta: 18 de febrero del 2018] [Disponible en: <http://residus.gencat.cat/web/.content/home/lagencia/publicacions/resum_estadistics_gestio_residus/resum_instal_2017.pdf>]

Ribas Font, Cristina (2015) *Desarrollo de un procedimiento de análisis para la determinación de siloxanos en biogás. Aplicación a depósitos controlados de residuos sólidos urbanos y estaciones depuradoras de aguas residuales* [en línia] dirigida por Francesc Broto Puig [Barcelona]: Tesis Doctoral. Universitat Ramon Llull, (IQS School of Engineering) [Consulta a: 3 de marzo del 2018] [Disponible en: <[ttps://tdx.cat](https://tdx.cat)>]

Rocío Briongos, *Ventajas e inconvenientes del compostaje*, EIMA, Escuela de Ingeniería y Medio ambiente, [Consulta: 31 de marzo del 2018] [Disponible en:

<<http://eimaformacion.com/ventajas-y-desventajas-del-compost/>>]

Trisoplast Mineral Liner: [Consulta 13 de enero del 2018] [Disponible en <http://www.trisoplast.nl/>]

Un yacimiento en la basura. Análisis de los vertederos de residuos domésticos en España., 38 páginas, noviembre, 2013. [Consulta: 17 de marzo del 2018] [Disponible en <http://www.retorna.rog>]

Últimas publicaciones de la AEMA en español. Red EIONET – Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) Gobierno de España, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio ambiente [Consulta: 24 de marzo del 2018] [Disponible a: <www.mapama.gob.es/...ambiental/.../agencia-europea-medio-ambiente...ambiental/eio>]

Ventajas e inconvenientes de la deposición controlada y de la incineración de los residuos (apartado, 3.6.). Cátedra de desenvolupament sostenible DOW /URV Módulos universitarios en ciencia del Desarrollo Sostenible (MOUDS) [Consulta: 7 de abril del 2018] [Disponible en: <<http://desenvolupamentsostenible.org/es/generacion-y-gestion-de-residuos-un-compromiso-con-la-sostenibilidad/3-la-gestion-de-los-residuos-municipales/36-ventajas-e-inconvenientes-de-la-deposicion-controlada-y-de-la-incineracion-de-los-residuos>>]. © 2018 Mòduls URV - Desenvolupament Sostenible

Versos Vertederos y Sostenibilidad. [Consulta: 13 de enero del 2018] [Disponible en: www.versos.org.es]

Wikipedia. [Consulta realizada en 12 de enero del 2018] [Disponible en: Depósitos Controlados, Lixiviados www.wikipedia.org]

REVISTAS:

Infoenviro, *Vertedero controlado de la comarca de Osona, con tratamiento de lixiviados y biogás*, mayo 2007, páginas 75-78 [Consulta a: 20 de enero del 2018] [Disponible en: <<https://www.residuosona.cat/diposit-controlat.php>>]

RETEMA, Revista Técnica de Medio Ambiente, *Alternativas para el aprovechamiento energético de residuos sólidos urbanos*, N° 187 noviembre - diciembre 2015 [Consulta: 20 de enero del 2018] [Disponible en: <<https://www.retema.es>>]

RETEMA, Revista Técnica de Medio Ambiente, *Centro de Tratamiento de Residuos de Osona y Ripollès. Orís, Barcelona*. N° 181 marzo-abril 2015 [Consulta: 20 de enero del 2018] [Disponible en: <<https://www.retema.es/articulo/centro-de-tratamiento-de-residuos-de-osona-y-ripolles-oris-barcelona-toChc>>]

RETEMA, Revista Técnica de Medio Ambiente, *Aprovechamiento del biogás: más allá*

Evaluación de sostenibilidad de los sistemas de impermeabilización de los depósitos controlados.

de la sostenibilidad. [Consulta: 20 de enero del 2018]. [Disponible en: <<https://www.retema.es/noticia/aprovechamiento-del-biogas-mas-alla-de-la-sostenibilidad-SrxTE>>]. Artículo de Isabel Coletto Fiaño, Talantia Environment. Fuente: <https://www.talantia.net/>

PROYECTOS:

Josep Colomer Oferil y Blai Parramon Pla, Juliol (2014), "Projecte per la construcció de la tercera fase d'ampliació del Vas B".

Ricard Planas Vilardruga, (2014) "Projecte executiu de la fase VII del dipòsit controlat de residus".

FUENTES FIGURAS:

Figura 1.1. *Depósito controlado*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 1.2. *Mecanismos de contaminación del medio*. Fuente: *Escuela de Organización Industrial (EOI)*. [Disponible en: <https://www.eoi.es/es>]

Figura 1.3. *Desarrollo sostenible*. Fuente: *Emprendices*. [Disponible en: <http://www.emprendices.co>]

Figura 1.4. *Sección capa impermeabilizante con barrera mineral natural*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 1.5. *Sección capa impermeabilizante con barrera mineral artificial*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 1.6. *Estructura de toma de decisión ante la existencia de una problemática*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.1. *Esquema del proceso de la gestión de residuos urbanos desde la recogida hasta el tratamiento*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.2. *Vertido de residuos*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.3. *Esquema de gestión de recogida de RSU*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.4. *Esquema de estación de transferencia de residuos urbanos*. Fuente: Cogersa. [Disponible en <https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fimage.slidesharecdn.com%2Fmoduloiv-recolecciontransferenciaytransporte-110927181002-phpapp02%2F95%2Fmodulo-iv-recoleccion-transferencia-y-transporte-26-728.jpg%3Fcb%3D1317147189&imgrefurl=https%3A%2F%2Fes.slideshare.net%2FVanessavvs>]

%2Fmodulo-iv-recoleccion-transferencia-y-transporte-9449494&docid=be3aNHla4BEk0M&tbid=7QWd5bgEpl1vuM%3A&vet=10ahUKEwjRqO69qMvbAhXltxQKHegYA_gQMwg6KAAwAA..i&w=728&h=546&safe=active&client=safari&bih=648&biw=1178&q=Esquema%20de%20estación%20de%20transferencia%20de%20residuos%20urbanos&ved=0ahUKEwjRqO69qMvbAhXltxQKHegYA_gQMwg6KAAwAA&iact=mrc&uact=8]

Figura 2.5. *Camiones de la recogida de residuos urbanos*. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona. [Disponible en: <http://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/es/servicios/la-ciudad-funciona/mantenimiento-del-espacio-publico/gestion-de-limpieza-y-residuos/recogida-de-residuos-domiciliarios>]

Figura 2.6. *Camiones procedentes de las estaciones de transferencia*. Fuente: Cogersa. [Disponible en: <http://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/19259-estaciones-de-transferencia?pms=1,48602,50045004,view,normal>]

Figura.2.7. *A la izquierda, Sistema de recogida neumático estático. A la derecha, buzones del sistema neumático estático*. Fuente: página web Loveoverde. [Disponible en: <https://loveoverde.wordpress.co>]

Figura 2.8. *Tratamiento de residuos urbanos en España (2013)*. Fuente: Eurostat. [Disponible en ec.europa.eu/eurostat]

Figura 2.9. *Porcentajes de tratamiento final de los residuos urbanos en la UE*. Datos: Eurostat. [Disponible en: ec.europa.eu/eurostat]

Figura 2.10. *Clasificación de los depósitos controlados*. Fuente: Elaboración propia

Figura 2.11. *Mecanismos de contaminación del medio*. Fuente: Escuela de Organización Industrial (EOI) [Disponible en: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45615/componente45613.pdf]

Figura 2.12. *Evolución del proceso de formación de biogás en un vertedero de RU*. Fuente: Tchobanoglous, 1983 Carreras, N. 2017, Producción y Recuperación de Biogás de Vertederos, Master en Gestión y Tratamiento de Residuos, UAM. (p.21)

Figura 2.13. *Elementos del sistema de extracción del biogás*. Fuente: Ferrovial Servicios. [Disponible en: [http://www.migm.posgrado.uclm.es/TitulosPropios/UserFiles463%5CRecursos%5CPC%3%BAblico%5CJCA\(parte%203\)b.pdf](http://www.migm.posgrado.uclm.es/TitulosPropios/UserFiles463%5CRecursos%5CPC%3%BAblico%5CJCA(parte%203)b.pdf)]

Figura 2.14. *A la izquierda, pozo de captación de biogás. A la derecha, estación de regulación del sistema de captación*. Fuente: Wikipedia. [Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=User:FerranRelea&action=edit&redlink=1>]

Figura 2.15. *Esquema sistema de transporte del biogás en serie*. [Disponible en: [http://www.migm.posgrado.uclm.es/TitulosPropios/UserFiles463%5CRecursos%5CP%C3%BAblico%5CJCA\(parte%203\)b.pdf](http://www.migm.posgrado.uclm.es/TitulosPropios/UserFiles463%5CRecursos%5CP%C3%BAblico%5CJCA(parte%203)b.pdf)]

Figura 2.16. *Esquema sistema de transporte del biogás en paralelo*. [Disponible en: [http://www.migm.posgrado.uclm.es/TitulosPropios/UserFiles463%5CRecursos%5CP%C3%BAblico%5CJCA\(parte%203\)b.pdf](http://www.migm.posgrado.uclm.es/TitulosPropios/UserFiles463%5CRecursos%5CP%C3%BAblico%5CJCA(parte%203)b.pdf)]

Figura 2.17. *Esquema sistema de transporte del biogás en anillo*. Disponible en: [[http://www.migm.posgrado.uclm.es/TitulosPropios/UserFiles463%5CRecursos%5CP%C3%BAblico%5CJCA\(parte%203\)b.pdf](http://www.migm.posgrado.uclm.es/TitulosPropios/UserFiles463%5CRecursos%5CP%C3%BAblico%5CJCA(parte%203)b.pdf)]

Figura 2.18. *Lixiviados*. Fuente: Desatascos Cubacas. [Dipsonible en: <https://www.desatascoscubacas.es/noticias-desatascos/gestion-de-residuos-y-vaciado-de-lixiviados-en-castellon>]

Figura 2.19. *Colocación de gravas drenantes del depósito controlado de Orís*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.20. *Red de captación dentro la capa drenante*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.21. *Caseta de bombeo de lixiviados*. Fuente: Wikipedia.

Figura 2.22. *Sección tipo del transporte de los lixiviados*. Fuente: Ricard Planas Vilardruga, (2014) “*Projecte executiu de la fase VII del dipòsit controlat de residus*”.

Figura 2.23. *Balsa de almacenamiento de lixiviados*. Fuente: Mapio.[Disponible en: <http://mapio.net/pic/p-54913822>]

Figura 2.24. *Planta de tratamiento de lixiviados*. Fuente: COGERSA. [Disponible en: <http://www.cogersa.es/metaspacerportal/14498/19173>]

Figura 2.25. *Protección mínima de los depósitos controlados de residuos no peligrosos*. Fuente: BOE. [Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2002/01/29/pdfs/A03507-03521.pdf>]

Figura 3.1. *Ampliación de la tercera fase del depósito controlado de Orís*. Fuente: “*Projecte per la construcció de la tercera fase d'ampliació del Vas B*”. [Disponible en: <https://www.residuosona.cat/uploads/editor/memoria.pdf>]

Figura 3.2 *Mapa territorial de Osona*. Fuente: Aldea Global. [Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiJ4rSeucvbAhWEvRQKHfoIbicQjRx6BAgBEAU&url=http%3A%2F%2Fwww.aldeaglobal.net%2Fartmedieval%2Fmapes%2Fmapa%2520osona.htm&psig=AOvVaw0Ih6xAz4iTsnkng1EREOi&ust=1528800868675509>]

Figura 3.3. *Evolución de la tasa de paro en Osona (2008-2017)*. Fuente: Observatori

Socioeconòmic d'Osona.[Disponible en:
<http://observatorideltreball.gencat.cat/ObservatoriDelTreball/servlet/mstrWeb>]

Figura 3.4. *Tasa de desempleo países Europa 2018*. Fuente: Datos Macro. [Disponible en: <https://www.datosmacro.com/paro-epa>]

Figura 3.5. *Emplazamiento del depósito controlado del depósito controlado de Orís*. Fuente: “Projecte per la construcció de la tercera fase d'ampliació del Vas B”. [Disponible en: <https://www.residusosona.cat/uploads/editor/memoria.pdf>]

Figura 3.6. *Vista aérea del depósito controlado de Orís*. Fuente: Residus Osona. [Disponible en: <https://www.residusosona.cat/diposit-controlat.php>]

Figura 3.7. *Roca calcolutita procedente de la excavación en voladura de la ampliación del depósito controlado de Orís*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.8. *Sección de la capa impermeabilizante con barrera mineral natural*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9. *Sección de la capa impermeabilizante con barrera mineral artificial*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.10. *Sección tipo del sistema tradicional de impermeabilización y drenaje del vertedero de Orís*. Fuente: “Projecte per la Construcció de la tercera fase d'ampliació del VAS B” en el municipio de Orís (Barcelona).

Figura 3.11. *Capa de arcillas compactadas sobre el vaso del depósito controlado de Orís (Osona)*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.12. *A la izquierda, rollo de manta de bentonita*. Fuente: Impenor Asbitra. [Disponible en: <http://www.telemadrid.es/noticias/madrid/noticia/el-campus-de-la-innovacion-de-madrid-echa-andar-en-la-nave-boetticher>] *A la derecha, colocación de la manta de bentonita*. Fuente: Grupo Parra.

Figura 3.13. *Punzonamientos y cortes de una geomebrana de PEAD*. Fuente: Terratest. [Disponible en: https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKEwiFys7r3cvbAhVKOxQKHWm0AHwQjRx6BAgBEAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.asociacionversos.org%2Ffiles%2Fdocumentos%2F_50%2FVERSOS08_JAVIER-MORENO-RESUMEN-VERTEDEROS-DE-ULTIMA-GENERACION.pdf&psig=AOvVaw3J0tRBfpdNikq4UWD9qmkC&ust=1528810670028923]

Figura 3.14. *Ejecución constructiva barrera mineral artificial*. Fuente: Grupo Terratest. [Disponible en: www.terratest.com/home.html]

Figura 3.15. *Superficie (m2) utilizada con Trisoplast según países*. Fuente: Trisoplast Mineral Liner. [Disponible en: www.trisoplast.nl]

Figura 3.16. *Dosificación Trisoplast*. Fuente: Trisoplast Mineral Liner. [Disponible en: www.trisoplast.nl]

Figura 3.17. *Extendido y compactación de Trisoplast*. Fuente: Grupo Terratest.

Figura 3.18. *Trisoplast: a) Planta de fabricación "in situ" y b) Puesto en obra*. Fuente: Grupo Terratest.

Figura 3.19. *Secciones tipo de las dos alternativas de sellado para el depósito controlado de Orís (Barcelona)*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1. *Alcance de la evaluación de sostenibilidad*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2. *Requerimientos que definen el desarrollo sostenible*. Fuente: Emprendices. [Disponible en: <https://www.desarrollosustentable.co/2013/04/que-es-el-desarrollo-sustentable.html>]

Figura 4.3. *Esquema requerimientos, criterios e indicadores*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.4. *Función de valor del indicador Inversión inicial*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.5. *Función de valor del indicador Disponibilidad del material*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.6. *Función de valor del indicador costes de mantenimiento*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.7. *Función de valor del indicador Tiempo de construcción (I₄)*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.8. *Función de valor del indicador Conocimiento técnico (I₅)*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.9. *Función de valor del indicador Impacto al tráfico (I₆)*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.10. *Función de valor del indicador Capacidad de impermeabilización (I₇)*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.11. *Función de valor del indicador Análisis de ciclo de vida (I₈)*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.12. *Proporción de puntuación de cada requerimiento respecto a la solución final*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.13. *Valoración de cada indicador respecto a la puntuación final*. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.14. *Resultados análisis de sensibilidad*. Fuente: Elaboración propia.

Figura A1.1. Esquema de gestión de recogida de RSU. Fuente: Elaboración propia

Figura A1.2. Contenedor de una sola fracción en EE.UU. Fuente: página web Smart Cities Council (02/06/2015). [Disponible en: <https://smartcitiescouncil.com>]

Figura A1.3. Distintas fracciones del modelo 4 Fracciones. Fuente: Ayuntamiento de Granada. [Disponible en: <https://www.granada.org>]

Figura A1.4. Distintas fracciones del modelo 5 Fracciones. Fuente: Ayuntamiento de Barcelona. [Disponible en: <http://ajuntament.barcelona.cat/es>]

Figura A1.5. Distintas fracciones modelo Residuo Mínimo. Fuente: Ayuntamiento de A Coruña. [Disponible en: <https://www.coruna.gal/portal/es?argIdioma=es>]

Figura A1.6. Distintas fracciones del modelo Multiproducto. Fuente: Ayuntamiento de Vic. [Disponible en: <https://www.vic.cat/ajuntament>]

Figura A1.7. A la izquierda, las 3 fracciones: negro (restos), marrón (orgánico) y azul (papel-cartón). A la derecha, máquinas de devolución de envases. Fuente: Ayuntamiento de Munich [Disponible en: <http://www.muenchen.de/sehenswuerdigkeiten/orte/120394.html>]

Figura A1.8. Mapa representativo de los distintos modelos de segregación selectivos de las capitales de provincia españolas. Fuente: Elaboración propia.

Figura A1.9. Sistema puerta por puerta en Guipúzkoa. Fuente: página web LEZO onigate iraukorra.[Disponible en: www.lezo.eus/es]

Figura A1.10. Sistema con contenedores superficiales en Barcelona (5 Fracciones). A la izquierda las fracciones restos y materia orgánica (áreas de acera) y a la derecha las fracciones selectivas (áreas de aportación). Fuente: Ayuntamiento de Barcelona. [Disponible en: <http://ajuntament.barcelona.cat/es>]

Figura A1.11 Buzones RINGO de los contenedores soterrados. Fuente: Formato Verde. [Disponible en: www.formatoverde.com]

Figura A1.12. Sistema con carga lateral (side). Fuente: Formato Verde. [Disponible en: www.formatoverde.com]

Figura A1.13. Sistema con carga trasera (back). Fuente: Formato Verde. [Disponible en: www.formatoverde.com]

Figura A1.14. Sistema con carga de pluma (clip). Fuente: Formato Verde. [Disponible en: www.formatoverde.com]

Figura.A1.15. A la izquierda sistema de recogida neumático estático. A la derecha buzones del sistema neumático estático. Fuente: página web Loveoverde.[Disponible en: <https://loveoverde.wordpress.com>]

Figura A1.16. Recogida neumática móvil. Fuente: web Miliarium. [Disponible en: <http://www.miliarium.com>]

Figura A2.1 *Interfaz del software SimaPro 8.0 y bibliotecas integrada*. Fuente: Elaboración propia.

Figura A2.2. *Comparación del ACV de los sistemas de barrera para vertederos por categorías de impacto*. Fuente: Elaboración propia.

Figura A2.3. *Comparación del ACV de los sistemas de barrera mineral por categorías de impacto por normalización*. Fuente: Elaboración propia.

Figura A2.4. *Impacto de cada material o proceso del sistema (BMN) para cada categoría de impacto*. Fuente: Elaboración propia.

Figura A2.5. *Impacto de cada material o proceso del sistema (BMA) para cada categoría de impacto*. Fuente: Elaboración propia.

